

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS, METALÚRGICA
E DE MATERIAIS PPGE3M

MATEUS FACCIO

**AVALIAÇÃO DE REVESTIMENTO ANTICORROSIVO ORGÂNICO APLICADO
EM VÁLVULAS DO TIPO ESFERA PARA OPERAÇÕES SUBSEA**

Porto Alegre
2017

MATEUS FACCIO

**AVALIAÇÃO DE REVESTIMENTO ANTICORROSIVO ORGÂNICO APLICADO
EM VÁLVULAS DO TIPO ESFERA PARA OPERAÇÕES SUBSEA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia, modalidade Acadêmica.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre da Silva Rocha
PPGE3M – UFRGS

Porto Alegre,
2017

MATEUS FACCIO

**AVALIAÇÃO DE REVESTIMENTO ANTICORROSIVO ORGÂNICO APLICADO
EM VÁLVULAS DO TIPO ESFERA PARA OPERAÇÕES SUBSEA**

Esta Dissertação foi analisada e julgada adequada para a obtenção do título de Mestre na área de concentração de Processos de Fabricação e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Dr. Alexandre da Silva Rocha
Orientador

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann
Coordenador do PPGE3M

Aprovado em ____/____/____

BANCA EXAMINADORA:

Álvaro Meneguzzi (Prof. Dr.) - PPGE3M/UFRGS _____

Rafael Menezes Nunes (Prof. Dr.) - DEMET/UFRGS _____

Joseane Ortiz (Dr^a.) - FAURGS/UFRGS _____

Dedico esta dissertação a DEUS e à minha família por estarem ao meu lado a todos os instantes e terem me auxiliado sempre na escolha do melhor caminho a ser seguido e nas melhores decisões a serem tomadas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha Mãe Elaine Maria Chioca Faccio, meu Pai Sergio Faccio e minha Irmã Maíra Faccio, a minha namorada Paula Costella Cielo por sempre estar ao meu lado, me apoiando em todos os momentos, incentivando na caminhada rumo a mais esta conquista e me mostrando que o conhecimento e o estudo são os únicos bens que não podem ser perdidos e que levamos até o fim de nossas vidas.

A todos meus amigos que sempre estiveram ao meu lado, em especial ao M.Sc. Eng. Douglas Gasparetto, M.Sc. Eng. Diogenes Teles, M.Sc. Eng. Maikson Tonato, Eng. Eduardo Boff, Eng. Wlateral Camera, Sr. José Francisco Mariano, Sr. Everson Zardo, pelo apoio e pelas suas contribuições no desenvolvimento deste trabalho.

A todas as pessoas envolvidas nos ensaios realizados junto ao LAMEF em especial M.Sc, Eng. Marcelo Favaro Borges, Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker (in Memoriam), M.Sc, Eng. João C. Brancher, Eng. Dra. Joseane O. B. Canterle e Eng. Luiz G. L. Rodrigues.

Ao Professor Dr. Alexandre Rocha pela sua orientação e disponibilidade em orientar o desenvolvimento deste trabalho.

A todos os Professores (as) do PPGE3M pelo conhecimento transferido neste período.

Ao apoio da empresa Micromazza, pela oportunidade de divulgação dos resultados obtidos neste trabalho, bem como disponibilização das bancadas de ensaio.

SUMÁRIO

RESUMO	IX
ABSTRACT	X
LISTA DE FIGURAS	XI
LISTA DE TABELAS	XIV
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS.....	XV
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XVI
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVO.....	2
2.1. OBJETIVO GERAL.....	2
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
3.1. VÁLVULAS INDUSTRIAIS.....	3
3.1.1. Válvulas tipo esfera	5
3.1.2. Projeto de válvulas esfera	7
3.1.3. Revestimento Anticorrosivo Orgânico Aplicado em Válvulas Esferas.....	9
3.1.4. Propriedades do revestimento etileno clorotrifluoroetileno.....	10
3.2. CORROSÃO	14
4. METODOLOGIA	18
4.1. ENSAIOS PARA QUALIFICAÇÃO DO REVESTIMENTO HALAR – ECTFE	18
4.1.1. Ensaio de fadiga.....	18
4.1.2. Ensaio de adesão.....	20
4.2. TESTES EM VÁLVULAS TIPO ESFERA (PROTÓTIPOS).....	22
4.2.1. Ensaio de Ciclos de pressão	22
4.2.2. Ensaio de Circulação sobre vazão	24
4.2.3. Circulação com água arenosa.....	25
4.2.4. Ensaio de corrosão	26
4.2.5. Equipamentos gerais para a realização do ensaio	29
4.3. PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA E PROTÓTIPOS.....	29
4.3.1. Pré-usinagem dos protótipos.....	31
4.3.2. Limpeza e Descontaminação Térmica	31
4.3.2.1. Ensaio de Contaminação Salina	32

4.3.3.	Jateamento abrasivo	33
4.3.3.1.	Verificação Visual do Preparo da Superfície	34
4.3.3.2.	Verificação do perfil de rugosidade	35
4.3.3.3.	Ensaio de Contaminação por Pó.....	36
4.3.4.	Aplicação do Revestimento	37
4.3.4.1.	Aplicação do <i>Primer</i>	38
4.3.4.2.	Aplicação do <i>Top Coat</i>	39
4.3.5.	Controle de qualidade do revestimento	39
4.3.5.1.	Verificação Visual do Revestimento.....	40
4.3.5.2.	Ensaio de Medição de Espessura do Revestimento	40
4.3.5.3.	Ensaio de Verificação de Descontinuidade	41
4.3.5.4.	Ensaio de Medição de Dureza do Revestimento	42
4.3.6.	Usinagem Final Pós-Revestimento	43
4.3.7.	Montagem e Testes de Vedação	44
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
5.1.	ENSAIOS EM CORPOS DE PROVA.....	45
5.1.1.	Ensaio de Fadiga	45
5.1.2.	Ensaio de Adesão.....	46
5.2.	ENSAIOS EM PROTÓTIPOS	49
5.2.1.	Ensaio de Ciclo de Pressão.....	50
5.2.1.1.	Teste de vazamento	51
5.2.1.2.	Inspeção do revestimento	52
5.2.2.	Ensaio de Circulação com água arenosa	52
5.2.2.1.	Teste de vazamento	53
5.2.2.2.	Inspeção final do revestimento.....	54
5.2.3.	Ensaio de Corrosão com Defeito.....	54
5.2.3.1.	Verificação do potencial e corrente de corrosão	55
5.2.3.2.	Inspeção final do revestimento.....	56
5.2.4.	Ensaio de Circulação sob Vazão	58
5.2.5.	Ensaio de Corrosão sem Defeito	59
5.2.5.1.	Verificação do potencial e corrente de corrosão	59
5.2.5.2.	Inspeção final do revestimento.....	60
5.2.6.	Discussão do deslocamento do revestimento anticorrosivo orgânico.....	61

6.	CONCLUSÕES.....	64
7.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	65
8.	REFERÊNCIAS	66

RESUMO

Motivada pelos inúmeros desafios relacionados à exploração de petróleo na região do pré-sal, onde o ambiente agressivo aliado com a grande profundidade são fatores sempre presentes, a busca por materiais alternativos para aplicações em válvulas ganhou destaque. As válvulas *subsea*, essenciais para projetos de exploração nestas áreas são consideradas um desafio ainda maior. Dessa maneira, estudos e ensaios de desempenho em revestimentos anticorrosivos orgânicos nesse ambiente tornam-se necessários. O objetivo deste trabalho é avaliar a resistência à corrosão e ao desgaste do revestimento anticorrosivo orgânico ECTFE (Halar®) para a aplicação em válvulas industriais do tipo esfera para operações *subsea*, através da realização de ensaios em corpos de prova e em protótipos, perante as condições simuladas do ambiente agressivo na qual deverão operar em conformidade com o programa de qualificação do revestimento D-SMA/ING/SPF/TCNA-14-00047. Para a realização dos ensaios, foram projetados sistemas de tubulações fechadas (loopings), nos quais os protótipos foram instalados. Os parâmetros de testes estabelecidos, assim como os dados monitorados pelos sensores instalados, foram coletados durante todo o período de teste. Os ensaios definidos para a avaliação do revestimento orgânico em protótipos foram: ciclos de pressão, circulação sob vazão, circulação com água arenosa e ensaios de corrosão com e sem defeito imposto no revestimento. Complementarmente, corpos de prova em escala reduzida foram submetidos a ensaio de adesão e de fadiga. Os resultados obtidos foram conclusivos e o revestimento mostrou-se resistente às condições impostas aos protótipos, uma vez que não foram detectadas descontinuidades consideradas relevantes segundo os critérios de aceitação pré-estabelecidos em procedimento.

Palavras-chave: *Subsea*, protótipos, revestimento orgânico, válvulas tipo esfera.

ABSTRACT

The search for alternative materials for applications in valves has been highlighted motivated by the numerous challenges related to oil and gas in the pre-salt region, where the aggressive environment combined with great depth are always present factors. The subsea valves, essential for exploration projects in these areas, are considered an even bigger challenge, thus, studies and performance tests on organic anti-corrosion coatings in this environment become necessary. The purpose of this study is to evaluate resistance to corrosion and wear of organic anti-corrosion coating ECTFE (Halar®) for application of industrial ball valves for subsea operations, by conducting tests on specimens and prototypes, under simulated harsh environment conditions in which they should operate in accordance with the coating qualification program D-SMA / ING / SPF / TCNA-14-00047. Closed pipes systems are designed (loops) for the carrying out of the tests, in which the prototypes were installed. The set of test parameters as well as the monitored data by installed sensors were collected during the entire test period. The defined tests for the evaluation of the organic coating in prototypes were: pressure cycles, flow rate circulation, circulation in soapy water and corrosion tests with and without defects imposed in the coating. In addition, reduced specimens were submitted to adhesion and fatigue tests. The results were conclusive and the coating was resistant to the imposed conditions on prototypes, since relevant discontinuities were not detected according to pre-established acceptance criteria for the procedure.

Keywords: *Subsea*, prototypes, organic coating, ball valves.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Válvulas utilizadas na plataforma de petróleo P-III da Petrobras.....	4
Figura 2: Classificação das válvulas de acordo com o sistema de acionamento.....	5
Figura 3 – Sistema de vedação da válvula esfera flutuante.....	6
Figura 4 – Sistema de vedação da válvula esfera trunnion.	7
Figura 5: Principais etapas do processo de revestimento orgânico	10
Figura 6: Representações da estrutura química do ECTFE.....	11
Figura 7: Características superficiais do ECTFE: a) Comparação de dureza do ECTFE. b) Imagem de microscopia de força atômica ($20 \times 20\mu\text{m}$).....	14
Figura 8: Zonas de corrosão de uma estrutura submersa no mar.	15
Figura 9: Dimensões do corpo de prova de fadiga.	18
Figura 10: Corpo de prova para ensaio de fadiga revestido	19
Figura 11: Corpo de prova tipo chapa.	20
Figura 12: Aparato experimental para realização do ensaio de adesão.	21
Figura 13: Protótipo instrumentado para realizar ensaio de ciclo sobre pressão.....	23
Figura 14: Sistema de Loopings para ensaio de circulação sobre vazão.....	24
Figura 15: Sistema de Loopings para ensaio de circulação c/ água arenosa	26
Figura 16: (a) defeito passante a montante da válvula; (b) defeito superficial a jusante da válvula; (c) medição de espessura remanescente no defeito superficial	27
Figura 17: Sistema de Loopings para ensaio de corrosão	28
Figura 18: Sistema de medição de potencial.	28
Figura 19: Etapas da aplicação do revestimento orgânico.	30
Figura 20: Regiões pré-usinadas de uma válvula tipo esfera	31
Figura 21: Equipamento utilizado para o processo de descontaminação térmica	32
Figura 22: Realização de ensaio de contaminação salina.....	33
Figura 23: Equipamento utilizado para o processo de jateamento abrasivo.....	34
Figura 24: Verificação visual da preparação de superfície.....	34

Figura 25: Medição do perfil de rugosidade.....	35
Figura 26: Graus de comparação – Contaminação por pó.....	37
Figura 27: Processo de revestimento por pistola eletrostática.....	37
Figura 28: Aplicação do ECTFE (Halar 6614 – <i>Primer</i>)	38
Figura 29: Aplicação do ECTFE (Halar 6014 – <i>Top-Coat</i>)	39
Figura 30: Bolhas e escorrimento detectados pela inspeção visual.....	40
Figura 31: Ajuste do equipamento e medição de espessura de película seca.....	41
Figura 32: Ensaio de descontinuidade no revestimento método <i>Holiday Detector</i> via úmida.....	42
Figura 33: Medição de dureza do revestimento.....	43
Figura 34: Usinagem final do pós revestimento	43
Figura 35: Bancada para testes de pressão	44
Figura 36: Análise estatística dos dados do ensaio de fadiga.....	45
Figura 37: Corpo-de-prova após ensaio de fadiga.....	46
Figura 38: Amostra R 305/6 ensaiada com o adesivo Loctite®406 no dia 06/05/2015.....	47
Figura 39: (a) amostra R 313/1; (b) pino da amostra R 313/1; (c) amostra R 313/3; (d) pino da amostra R 313/3; (e) amostra R 314/1; (f) pino da amostra R 314/1; (g) amostra R 314/3 e (h) pino da amostra R 314/3.....	49
Figura 40: Subdivisões da válvula desmontada.....	50
Figura 41: Gráfico de ciclagem sobre pressão.....	51
Figura 42: Desgaste na esfera da válvula V1 após ensaio de circulação com água com areia.....	53
Figura 43: Vazamento registrado durante o ensaio.	53
Figura 44: Inspeção da válvula V1 desmontada após teste de vazamento.	54
Figura 45: Potencial medido nos trechos A e B do <i>looping 3</i>	55
Figura 46: Corrente medida entre os trechos A e B do <i>looping 3</i>	56
Figura 47: Inspeção via correntes parasitas na válvula V2 após ensaio de corrosão.	56
Figura 48: Indicação do equipamento de inspeção por correntes parasitas na válvula V2 após ensaio de corrosão. (a) região a montante; (b) região a jusante	57
Figura 49: Defeitos por descolamento e/ou bolhas na parede interna do corpo da válvula 2. .	57

Figura 50: Potencial e Corrente medido nos trechos A e B do looping 2.	60
Figura 51: Inspeção da válvula 3 via correntes parasitas.	60
Figura 52: Defeitos por descolamento e/ou bolhas na válvula V3 após ensaio de corrosão. (a) na parede interna do corpo da válvula; (b) na aresta interna do corpo da válvula.	61
Figura 53: Sequencia de operações realizadas para analisar o deslocamento do revestimento	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Padrões construtivos de válvulas industriais do tipo esfera.	8
Tabela 2: Limites de temperatura de serviço de válvulas esfera de uso geral.....	8
Tabela 3: Propriedades gerais do ECTFE.....	11
Tabela 4: Resistência química do ECTFE comercial.	12
Tabela 5: Dados de permeabilidade do ECTFE.	13
Tabela 6: Perfil de rugosidade obtido em função do abrasivo.	36
Tabela 7: Sequência de testes de vedação.	44
Tabela 8: Tensão de arrancamento à tração.....	47
Tabela 9: Tensão de arrancamento à tração para amostras com pino inserido.....	48
Tabela 10: Média e desvio padrão do ensaio de ciclos de pressão.....	51
Tabela 11: Parâmetros utilizados para inspeção da válvula 1 no seu primeiro ensaio.	52
Tabela 12: Parâmetros utilizados na inspeção da válvula V1 no seu segundo ensaio.....	54
Tabela 13: Parâmetros utilizados para inspeção da válvula 3.	59

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
AID – Aços inoxidáveis duplex
AISD – Aços inoxidáveis super duplex
API – *American petroleum institute*
ASME – *American society of mechanical engineers*
ASTM – *American society for testing and materials*
CLP – Controlador Lógico Programável
DN – Diâmetro nominal (mm)
ECTFE – Etileno clorotrifluoroetileno
EPC – *Eletrostatic Powder Coating*
ET – Especificação técnica
ISO – *International organization for standardization*
LAMEF – Laboratório de Metalurgia Física
NACE – *National association of corrosion engineers*
NBR – Norma Brasileira da ABNT
NPS – *Nominal pipe size* (polegadas)
pH – Potencial de hidrogênio
PMT – Pressão máxima de trabalho
PVC – Poli (cloreto de vinila)
Sa – *Standard Abrasive Blasting*
SCM – *Salt Contamination Meter*
UR – Umidade relativa do ar

LISTA DE SÍMBOLOS

Ag – Área de contato entre a gaxeta e placa de reação

Aps – Área do pino

BS – Força de arrancamento registrada no equipamento

C – Constante do pistão fornecida pelo fabricante

POTS – Tensão de arrancamento

V1– Válvula 1

V2– Válvula 2

V3– Válvula 3

1. INTRODUÇÃO

A recente demanda por materiais alternativos para aplicações em válvulas foi motivada pelos inúmeros desafios relacionados à exploração de petróleo e gás em campos no pré-sal e aplicações em ambientes agressivos, águas ultra-profundas e de elevada responsabilidade operacional. A utilização de materiais especiais para a fabricação de válvulas tornou-se viável, uma vez que representa uma elevada parcela do custo final ao produto, devido ao alto valor agregado presente neste tipo de aplicação.

A utilização do revestimento anticorrosivo é uma forma alternativa de substituir materiais nobres em aplicações que apresentam ambientes altamente severos e com elevado grau de risco e que envolve diferentes condições de temperatura, pressão e meio corrosivo. Além disso, o polímero apresenta uma excelente relação de custo e benefício a qual pode ser explicada pela utilização do aço carbono como material de base para a aplicação do revestimento orgânico, substituindo dessa forma, ligas metálicas especiais com elevado custo de fabricação.

A aplicação de revestimentos anticorrosivos orgânicos consiste em impor uma barreira física entre a peça a ser protegida e o meio corrosivo ou de operação do equipamento. Ao avaliar as operações de revestimento a serem aplicadas em válvulas do tipo esfera, parâmetros como o desgaste, agressividade do fluido, variação dimensional e temperatura de operação são fatores fundamentais que devem ser verificados.

Neste trabalho, o material utilizado para o revestimento dos corpos de prova como também para os protótipos foi o ECTFE (Etileno clorotrifluoroetileno) Halar® 6614 para a camada base (*primer*) e o Halar® 6014 para as camadas de acabamento (*top coat*).

Para auxiliar o bom desempenho e a confiabilidade do revestimento anticorrosivo orgânico em aplicações altamente agressivas e de extrema responsabilidade, um programa de teste foi estabelecido como requisito obrigatório para sua qualificação. Dentro deste escopo de qualificação, foram realizados ensaios de ciclos de pressão, circulação sob vazão, circulação com água arenosa e ensaios de corrosão com e sem defeito imposto, os quais foram realizados em protótipos revestidos. Além disso, ensaios de adesão e de fadiga também foram realizados, porém em corpos de prova em escala reduzida.

O intuito central desse trabalho foi verificar e avaliar se os resultados obtidos nos ensaios atendem aos critérios de aceitação pré-estabelecidos para a validação do revestimento anticorrosivo orgânico ECTFE (Halar®) em sua aplicação *subsea*.

2. OBJETIVO

2.1. OBJETIVO GERAL

Avaliar por meio de ensaios diversos o comportamento do revestimento anticorrosivo orgânico ECTFE (Halar®) para a aplicação em válvulas industrial do tipo esfera para operações *subsea*.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Pesquisar e apresentar uma abordagem geral sobre válvulas industriais com foco em válvulas do tipo esfera observando sua funcionalidade e aplicações nas mais diversas áreas de aplicação.
- b) Apresentar as características, etapas e os procedimentos de ensaios do revestimento anticorrosivo orgânico ECTFE (Halar®).
- c) Verificar e analisar se os resultados obtidos nos ensaios atendem aos critérios de aceitação pré-estabelecidos conforme a norma (D-SMA/ING/SPF/TCNA-14-00047) para a validação do revestimento anticorrosivo orgânico ECTFE (Halar®) em sua aplicação *subsea*.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. VÁLVULAS INDUSTRIAIS

Válvulas industriais são dispositivos mecânicos concebidos especificamente para direcionar, iniciar, bloquear, misturar ou regular o fluxo, pressão ou temperatura de fluidos em processos industriais (SKOUSEN 2004).

Válvulas são equipamentos utilizados amplamente em inúmeros processos industriais, representando em média 8% do custo total de uma instalação. No caso da indústria do petróleo e gás podem alcançar de 20 a 30% dos custos de tubulação (SILVA, 2008).

Existe uma grande quantidade de modelos de válvulas, e as mesmas podem ser utilizadas nas mais diferentes aplicações. Em função dessa grande variedade, a escolha da válvula correta é de fundamental importância para prevenir futuras paradas do processo e acidentes, muitas vezes fatais. (SILVA, 2008).

Segundo Mathias (2008) e Silva (2008), as válvulas podem ser divididas em quatro grupos onde o padrão construtivo pode variar de acordo com a função específica que o equipamento vai desempenhar.

- a) Válvula de bloqueio (*block-valves*): Opera na condição de totalmente aberta ou fechada à passagem do fluido. A mesma apresenta seu diâmetro de passagem nominal à tubulação. Os principais modelos são:
 - Válvula Gaveta (*Gate-valve*);
 - Válvula Esfera (*Ball-valve*);
 - Válvula Macho (*Plug-valve*);
 - Válvula *Two Port Diverter*.
- b) Válvula de regulação (*throttling-valves*): Pode trabalhar parcialmente aberta e fechada, são utilizadas para controlar o fluxo do fluido, mesmo totalmente aberta geram perda de carga no sistema em função do diâmetro de passagem ser menor que a da tubulação. Os modelos mais importantes são:
 - Válvula Borboleta (*Butterfly-valve*);
 - Válvula Agulha (*Needle-valve*);
 - Válvula Globo (*Globe-valve*);
 - Válvula Slide (*Slide-valve*);
 - Válvula Plug;

- Válvula Diafragma (*Diafragma-valve*).
- c) Válvula de Segurança (*Safety valve*): Equipamento auto-operado, utiliza a energia do próprio fluido para sua operação, são utilizadas em vários processos, onde previne eventual sobrepressão no sistema, garantindo assim a segurança no sistema.
 - Válvula de Alívio (*relief valve*);
 - Válvula de Segurança (*safety valve*);
 - Válvula de Segurança e Alívio (*safety relief valve*);
 - Válvula de Alívio de Pressão e Vácuo (*Pressure vacuum relief valve*).
- d) Válvula de Retenção (*Check valves*): Impede o retorno do fluido no sentido do escoamento
 - Válvula de Pé (*foot valve*);
 - Válvula de Retenção (*check valve*);
 - Válvula de Retenção e Fechamento (*stop-check valve*).

A Figura 1(a) e (b) ilustra alguns modelos de válvulas industriais em seus respectivos campos de aplicação, como por exemplo, em plataformas na exploração de petróleo, em refinarias, em equipamentos em geral, desempenhando funções específicas e de grande responsabilidade.

Figura 1: Válvulas utilizadas na plataforma de petróleo P-III da Petrobras.

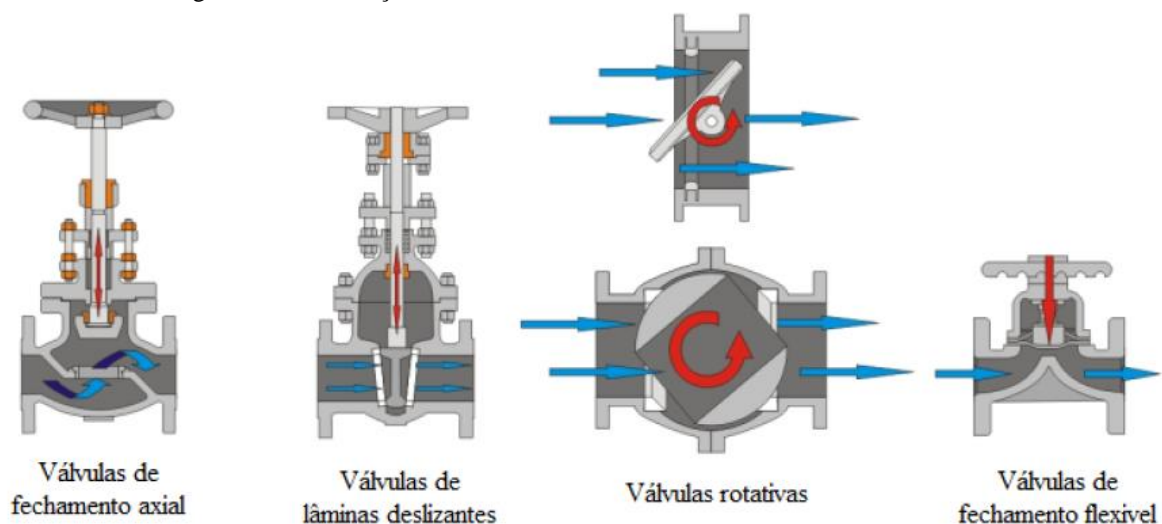


Fonte: Adaptado do arquivo Micromazza, 2014.

Segundo Smith e Zappe (2004), válvulas de acionamento manual podem ser classificadas em quatro grupos de acordo com o método de obstrução do fluido. A Figura 2 ilustra os padrões construtivos caracterizados abaixo.

- a) Válvulas de fechamento axial: Neste modelo o obturador se desloca em direção axial à vedação.
- b) Válvulas de lâminas deslizantes: o obturador em forma de lâmina paralela ou em ângulo se move cruzando o sentido do fluxo perpendicularmente, interrompendo sua passagem.
- c) Válvulas rotativas: o obturador pode ter formato esférico, plugue ou disco na qual realiza movimento de rotação para bloquear o fluxo.
- d) Válvulas de fechamento flexível: possuem membrana de material flexível o qual recebe compressão do obturador para impedir a passagem de fluxo.

Figura 2: Classificação das válvulas de acordo com o sistema de acionamento.



Fonte: Adaptado do arquivo Micromazza, 2011.

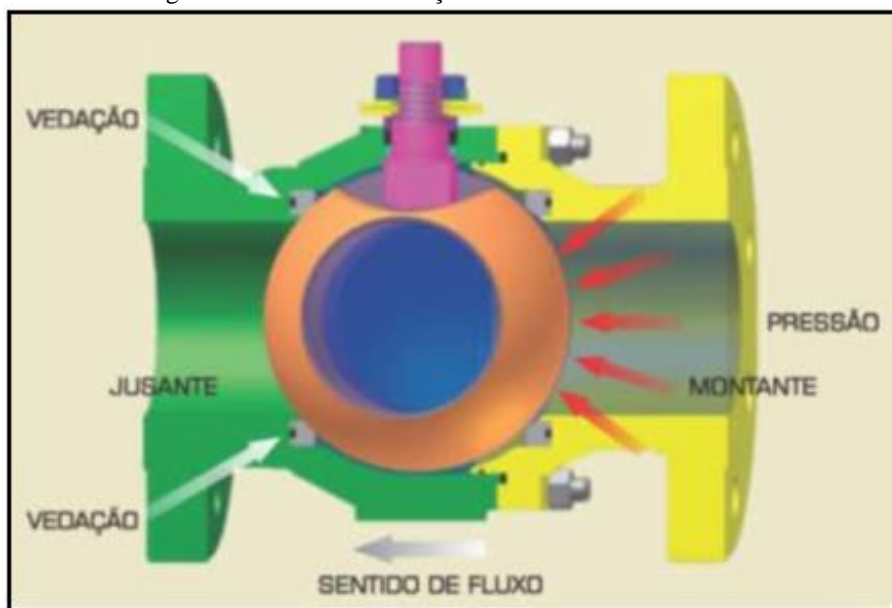
3.1.1. Válvulas tipo esfera

Válvula esfera apresentam funcionamento *on-off* com movimento rotacional de 0° a 90° onde uma esfera é utilizada como obturador. Quando a válvula estiver aberta a passagem da esfera fica totalmente alinhada à tubulação, permitindo o escoamento do fluido. Quando a passagem da esfera se encontrar perpendicular à tubulação, ocorre o bloqueio da passagem do fluido. Uma característica da válvula esfera é a rapidez na operação, sendo que para operar esse modelo é necessário apenas um quarto de volta, além disso, apresenta uma ótima estanqueidade mesmo em altas pressões e a perda de carga é desprezível. (MATHIAS 2008) (SILVA 2008) (FORSMAN e MORIN 2005).

Uma válvula esfera pode apresentar diferentes padrões construtivos e assim pode ser classificada (DICKENSON 1999) (SMITH e ZAPPE 2004) (SILVA 2008) (MATHIAS, 2008):

-Válvula esfera flutuante: este padrão construtivo, conforme representado na Figura 3 é utilizado para pequenos diâmetros, onde o obturador possui liberdade de movimento. Sendo assim a aplicação de uma pressão à montante da válvula faz com que a esfera flutue ao encontro da sede gerando uma força mecânica e ocasionando a vedação à jusante da válvula.

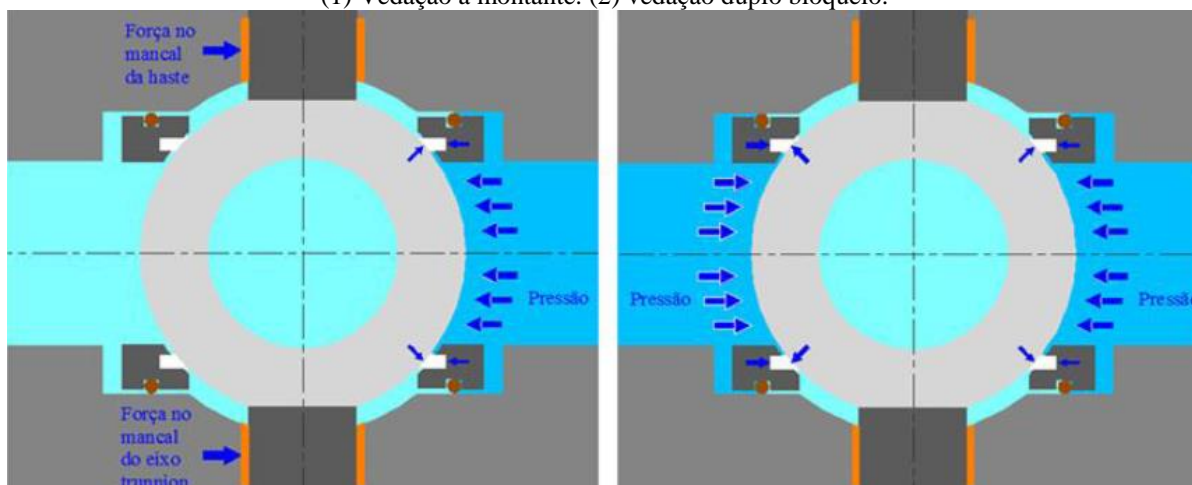
Figura 3 – Sistema de vedação da válvula esfera flutuante.



Fonte: Gasparetto, 2013.

-Válvula esfera *trunnion*: a esfera é apoiada por dois eixos, um na parte superior, denominado de haste e outro na parte inferior de eixo *trunnion*, os quais se movimentam em sentido rotacional, deslocando o obturador para a posição aberta ou fechada. Conforme representado na Figura 4, a vedação ocorre por meio do efeito pistão, ou seja, ocorre o deslocamento do anel da sede. O qual possui um inserto de material resiliente, o mesmo encontra a esfera, proporcionando assim a vedação à montante da válvula. Esse padrão construtivo permite também efetuar a vedação de duplo bloqueio, tanto à montante quanto a jusante. (TELES 2013).

Figura 4 – Sistema de vedação da válvula esfera trunnion.
(1) Vedação a montante. (2) vedação duplo bloqueio.



Fonte: Teles, 2013.

3.1.2. Projeto de válvulas esfera

Para desenvolver um projeto de uma válvula industrial do tipo esfera, devem-se atender inúmeras normas nacionais e internacionais, além de especificações de materiais, requisitos normativos e conceitos de engenharia de forma a garantir a eficiência do equipamento perante sua aplicação. (MATHIAS 2008).

O projeto de válvulas industriais no Brasil utiliza como base a norma ABNT NBR 15827 2014 a qual estabelece os requisitos de projeto e ensaios de protótipos em válvulas industriais para instalações de explorações, produção, refino e transporte de produtos de petróleo.

O projeto de válvulas industriais pode apresentar diferentes configurações de materiais, desde aço carbono, aço inoxidável e, dependendo da aplicação, ligas especiais de alto desempenho. A Tabela 1 apresenta outras normas a serem consultadas e seguidas no projeto de válvula industrial do tipo esfera. (GASPARETTO 2013).

Tabela 1: Padrões construtivos de válvulas industriais do tipo esfera.

Parâmetros	Material do corpo/Extremidades da válvula						
	Aço fundido ou forjado				Aço forjado		
	Flange ou solda de topo ^b				Roscada	Encaixe para solda	
DN ^a (NPS)	50 a 900 (2 a 36)	50 a 600 (2 a 24)	50 a 400 (2 a 16)	50 a 300 (2 a 12)	15 a 40 (½ a 1 ½)		
Classe	150 a 600	900	1500	2500	150	800	1500 e 2500
Padrão construtivo	ISO 14313 (API 6D) e Anexo C				BS ISO 7121	ISO 17292, e Anexo C	ASME B16.34, e Anexo C

^a DN = diâmetro nominal, expresso em milímetros (mm)

^b Para diâmetros maiores do que os padronizados, a dimensão face a face deve ser acordada entre o fabricante e o comprador. O projeto deve ser conforme ASME B16.34

Fonte: NBR 15827 (2014)

Com o conhecimento das normas de construção, o projeto da válvula pode ser inicializado. O primeiro ponto a verificar é a classe de pressão para a qual a válvula será projetada. O mesmo consiste em um número adimensional que leva em conta os limites operacionais de pressão em função da temperatura de operação e material de construção do corpo da válvula. Esses parâmetros são definidos pelas normas ANSI/API 6D/ISO 14313, 2008 e ASME B16.34, 2009 (MATHIAS 2008).

As temperaturas de serviço para as válvulas esfera com vedações resilientes estão diretamente relacionadas com o tipo de aço utilizado para fabricação do corpo da válvula. São definidas pela norma ABNT NBR 15827, 2014, conforme ilustrado na Tabela 2.

Tabela 2: Limites de temperatura de serviço de válvulas esfera de uso geral.

TIPO DE VÁLVULA	TIPO DE VEDAÇÃO	MATERIAL DO CORPO	TEMPERATURA MÍNIMA	TEMPERATURA MÁXIMA
ESFERA	SEDE RESILIENTE	AÇO – LIGA/ INOX	-45 °C	150 °C
ESFERA	SEDE RESILIENTE	AÇO – CARBONO	-29 °C	150 °C

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15827, 2014

Para válvulas do tipo esfera com revestimento interno anticorrosivo, além de seguir todas as normas mencionadas anteriormente, inúmeras especificações técnicas devem ser atendidas além do conhecimento técnico das características do revestimento.

3.1.3. Revestimento Anticorrosivo Orgânico Aplicado em Válvulas Esferas

A busca por materiais alternativos para aplicações em válvulas vem sendo motivada pelos inúmeros desafios relacionados à exploração de petróleo em campos no pré-sal e aplicações em ambientes agressivos e de elevada responsabilidade. A produção de óleo em condições de processo exigentes e severas envolvendo elevadas temperaturas, pressão e concentração de CO₂ e H₂S, proporciona a deterioração de inúmeros equipamentos envolvidos no processo devido a altas taxas de corrosão. (KOEBSCH, et al., 2010), (COSTA, 2009).

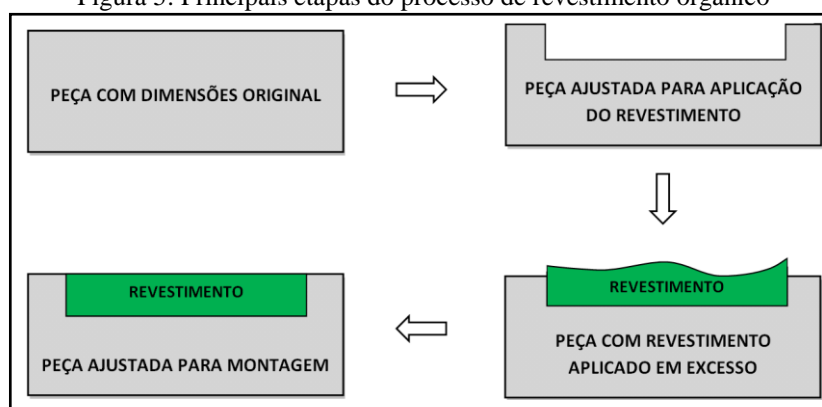
A especificação para tais aplicações severas são válvulas de aço inoxidável duplex (AID) e super-duplex (AISD) o qual apresenta uma ótima combinação de elevadas propriedades mecânicas e resistência à corrosão (SENATORE, et al., 2007). Inúmeros relatos documentais comprovam a eficiência dos aços inoxidáveis duplex os quais foram utilizados por um longo período em aplicações como processamento químico, petroquímico, extração e petróleo *onshore e offshore*.

A utilização de materiais especiais para a fabricação de válvulas representa um elevado custo final ao produto, dessa forma tornou-se viável a utilização de materiais alternativos. Perante essa necessidade a Petrobras iniciou estudos e realizou testes em válvulas esfera de aço carbono com revestimento orgânico anticorrosivo (KOEBSCH, et al., 2010).

Ao avaliar o tipo de revestimento a ser aplicado em válvulas do tipo esfera, parâmetros como o desgaste, agressividade do fluido, variação dimensional e temperatura de operação são fatores fundamentais que devem ser verificados. A aplicação do revestimento anticorrosivo orgânico consiste em impor uma barreira física entre a peça a ser protegida e o meio corrosivo ou de operação do equipamento (GASPARETTO 2013).

A aplicação do revestimento orgânico é subdividida em três etapas consideradas primordiais para o processo. Apresentadas conforme ilustrado na Figura 5, o primeiro passo é realizar a pré-usinagem das peças e na sequência a aplicação do revestimento e, por fim, a pós-usinagem para adequação das medidas de projeto (ET-940-PEN-006, Rev. D - 2012).

Figura 5: Principais etapas do processo de revestimento orgânico



Fonte: Adaptado do arquivo Micromazza, 2011.

Inércia química, aderência e resistência a erosão são propriedades fundamentais que o revestimento deve apresentar. (COSTA, 2009). A escolha do tipo de revestimento a ser utilizado em aplicações de válvulas do tipo esfera para operações *subsea* foi fundamentada nos critérios estabelecidos por Especificações Técnicas (ET-940-PEN-006), testados e aprovados pela empresa Petrobras. (QUINTELA, et al., 2010).

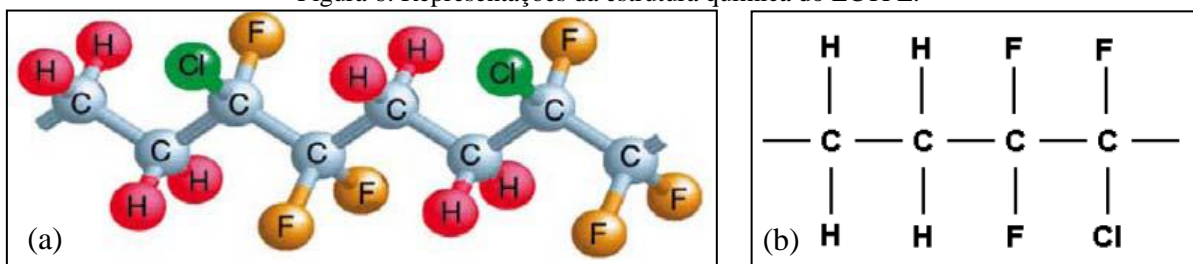
Os fluoropolímeros apresentam excelente resistência química para ácidos, bases e solvente. Eles são amplamente utilizados na indústria petroquímica, aeroespacial, automotiva, elétrica entre outras. (LEIVO 2003).

O revestimento utilizado para essa determinada aplicação é etileno clorotrifluoroetileno (ECTFE), fornecido pela empresa Solvay-Solexis. O material é constituído de uma combinação identificado como Halar 6614 sendo esse considerado o Primer e Halar 6014, o qual constitui a camada de acabamento.

3.1.4. Propriedades do revestimento etileno clorotrifluoroetileno

O etileno-clorotrifluoroetileno (ECTFE) foi criado na metade do século XX, é um copolímero de fórmula geral $\text{-(CH}_2\text{-CH}_2\text{-CFCl-CF}_2\text{)-}_n$, o qual é constituído de um átomo de cloro na unidade de repetição fluorada, tendo como mero o etileno na cadeia principal. A estrutura química é ilustrada na Figura 6 (a) e (b). (Simone, et al., 2012).

Figura 6: Representações da estrutura química do ECTFE.



Fonte: (EBNESAJJAD, 2003) e (SOLVAY SOLEXIS, 2006)

O ECTFE é considerado um termoplástico composto por unidade de etileno, cloro e trifluoretileno pertencente à classe dos fluoropolímeros, apresenta como propriedades principais a resistência (impacto, abrasão, permeação, intemperismo), baixa propagação de chama, elevada pureza, baixo coeficiente de atrito e estabilidade em altas temperaturas. Além disso, esse arranjo permite excelentes propriedades mecânicas, térmicas e químicas, funcionando como barreira para diversos produtos químicos (MEDEIROS, et al., 2012).

As propriedades gerais do ECTFE segundo (MAGGI, et al., 2009) são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3: Propriedades gerais do ECTFE.

Propriedades	Unidade	ECTFE
Ponto de fusão	°C	220-245
Gravidade específica	g/cm ³	1,68
Reistência Abrasão	cm ³	0,3
Dureza, Shore D (ASTM D 785)		75
Dureza, Rockwell R		93
Absorção de água	%	<0,1
índice de oxigênio	%	>52
Inflamabilidade (UL94)		V-O
Volume de Resistividade	Ohm-cm	>10 ¹⁵
Rigidez dielétrica em 1/8" de espessura	Vmil (V\mm)	370 (1,5x10 ⁴)

Fonte: MAGGI, et al. (2009)

O ECTFE apresenta uma ampla faixa de temperaturas de operação, no entanto suas propriedades podem variar em função da temperatura de aplicação. O polímero apresenta ponto de fusão de 222 a 245°C, porém seu uso é limitado a temperatura de 150°C a -70°C. Valores criogênicos abaixo disso podem fragilizar o revestimento. (MEDEIROS, et al., 2012).

O ECTFE foi submetido a 120 substâncias utilizadas pela indústria e após os testes verificou-se que as propriedades não sofreram alterações ao longo do período de exposição prolongado segundo observado pelo autor (SOLVAY SOLEXIS, 2010). Na Tabela 4 são apresentados o teste de resistência química, que mostraram um ganho de massa e alteração das propriedades mecânicas depois de 30 dias de exposição à substância. Também se pode verificar a concentração máxima das substâncias bem como a temperatura máxima de aplicação.

Tabela 4: Resistência química do ECTFE comercial.

Químico	Fórmula	Concentração	Temp. Máx. (°C)
Ácidos			
Clorídrico	HCl	37%	150
Fluorídrico	HF	50%	150
Nítrico	HNO ₃	65%	66
Fosfórico	H ₃ PO ₄	85%	150
Sulfúrico	H ₂ SO ₄	98%	125
		Oleo	23
Bases			
Hidróxido de amônia	NH ₄ (OH)	30%	150
Hidróxido de Potássio	KOH	30%	121
Hidróxido de Sódio	NaOH	50%	121
Hipoclorito de Sódio	NaClO	5% estabilizado pH 12	150
Hidrocarbonetos			
n-Hexano	CH ₃ (CH ₂) ₄ CH ₃	100%	150
Tolueno	C ₅ H ₅ CH ₃	100%	66
Álcool e éteres			
Metanol	CH ₃ OH	100%	65
Etanol	CH ₃ CH ₂ OH	100%	140
Ácidos orgânicos, ésteres e cetonas			
Ácidos acético	CH ₃ COOH	100%	>100
		50%	>121
Acetona	CH ₃ COCH ₃	100%	66
Acetofenona	C ₆ H ₅ COCH ₃	100%	50
Acetato de etilo	CH ₃ COOCH ₂ CH ₃	100%	50
Solventes Poliméricos Clássicos			
Dimetilfonmanida	CH ₃ COM(CH ₃) ₂	100%	50
Dimetilsulfóxido	CH ₃ SOCH ₃	100%	>100
N-Metilpirrolidona		100%	25
Solventes Halogenados			
Clorobenzeno	C ₆ H ₅ Cl	100%	66
Clorofórmio	CHCl ₃	100%	Não resistente
Aminas e nitrilos			
Acetonitrilo	CH ₃ CN	100%	>100
Aanilina	C ₆ H ₅ NH ₂	100%	100
Dimetilamina	(CH ₃) ₂ NH	100%	25
Peróxidos			
Peróxido de Hidrogênio	H ₂ O ₂	30%	>88
Fluídos Utilizados na Industria Automotiva			
Óleo Cru		100%	150
Óleo de engrenagem		100%	150
Gasolina		100%	150
Combustível Diesel		100%	150
Óleo Mineral		100%	150

Fonte: SOLVAY SOLEXIS (2006)

Além da elevada resistência química uma das propriedades considerada de extrema importância no revestimento orgânico é a resistência à permeação a qual tem a função de assegurar a proteção do substrato contra a corrosão. Conforme os valores comparativos apresentados na Tabela 5, o ECTFE apresenta uma elevada propriedade de barreira dentre os polímeros fluorados. (SOLVAY SOLEXIS, 2010).

Tabela 5: Dados de permeabilidade do ECTFE.

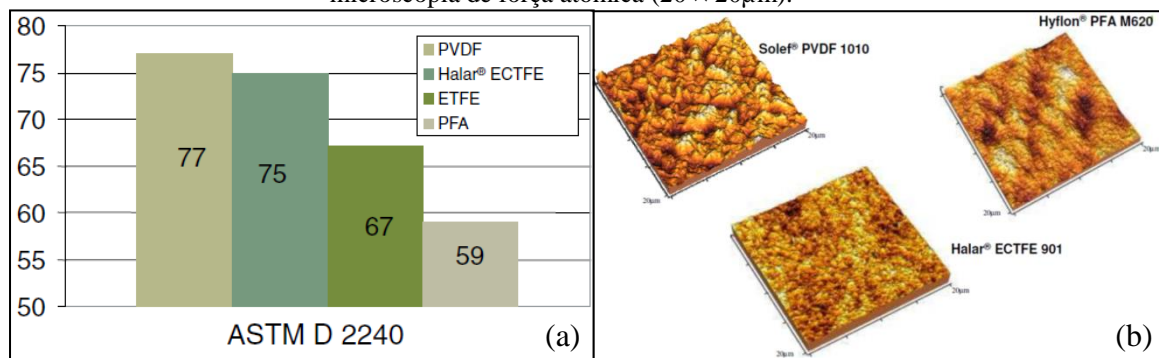
Temperatura de teste	Químico	Coeficiente de Permeação		
		ECTFE	ETFE	Unidade
25°C	O ₂	0,2	0,7 (0,6 ^a)	[cm ³ STP.mm/m ² .atm.24].10 ²
	N ₂	0,1	0,2 ^a	
	H ₂ O (Vapor)	7,5	98 ^b	
25°C	HCl para 37% de solução em água	0,01	0,07	[g.mm/m ² .24h]
	HNO ₃ para 65% de solução em água	<0,001 ^c	-	
	H ₂ SO ₄ para 96% de solução em água	<0,001 ^c	-	
50°C	HCl 37%	0,5	1,7	
	Metanol	0,3	1,2	
	H ₂ O Líquido	0,5	1,6	
Legenda				
^a -Dados da literatura publicados pelo fornecedor do ECTFE de acordo com ASME D1434				
^b -Dados da literatura publicados pelo fornecedor do ECTFE de acordo com ASME D1434				
^c -Sem permeação detectada após 2000 horas em amostra com 0,3 mm de espessura				

Fonte: SOLVAY SOLEXIS (2010)

As características superficiais do polímero também são atributos de suma importância para um bom desempenho de sua aplicação. A dureza do polímero conforme ilustrada na Figura 7(a) deve apresentar um valor em torno de 75 Shore D.

Além disso, a baixa rugosidade superficial também deve ser observada, pois ela permite reduzir as possíveis incrustações no interno da válvula. O ECTFE apresenta o menor coeficiente de atrito dinâmico, compreendido entre 0,1 a 0,2. A Figura 7(b) ilustra a imagem de microscopia de força atômica da superfície do polímero comparada a outros materiais. (SOLVAY SOLEXIS, 2006).

Figura 7: Características superficiais do ECTFE: a) Comparação de dureza do ECTFE. b) Imagem de microscopia de força atômica ($20 \times 20 \mu\text{m}$).



Fonte: SOLVAY SOLEXIS (2006)

3.2. CORROSÃO

A corrosão pode ser definida como a deterioração das propriedades de um material, o qual reage com o ambiente. Em uma linguagem termodinâmica a tendência de decréscimo energético é a principal força motriz da corrosão metálica (PANNONI, 2007).

As reações do processo corrosivo são consideradas químicas heterogêneas e eletrolíticas as quais geralmente ocorrem na superfície do metal em contato com o meio corrosivo. O metal se oxida e se reduz cedendo elétrons para o meio que são recebidos pelo oxidante. Isso identifica que a corrosão é um meio de destruição do metal. As principais formas de corrosão são: Uniforme, por Placa, Alveolar, Puntiforme, ou Pite, Intergranular, Filiforme, por Esfoliação, Grafítica, Dezincificação, Empolamento por Hidrogênio e em torno do cordão de solda. (GENTIL 2011).

O ambiente marinho é um dos meios naturais mais corrosivos, sendo que a água do mar tem como principais variáveis o teor de oxigênio, temperatura, salinidade e pH. Essas variáveis se alteram com o período do ano, profundidade, localização geográfica e temperatura. (LALGUDI 1990).

As principais formas de corrosão encontradas em um ambiente marinho são as seguintes:

Uniforme; ocorre em toda a superfície exposta do metal, considerada uma corrosão uniforme que resulta na diminuição gradual do metal. No entanto pode ocorrer a formação de camadas de produtos de corrosão que inibem a corrosão ao longo do tempo.

Alveolar; a corrosão acontece na superfície metálica formando sulcos ou escavações semelhantes a alvéolos, com fundo arredondado e profundidade menor que o diâmetro.

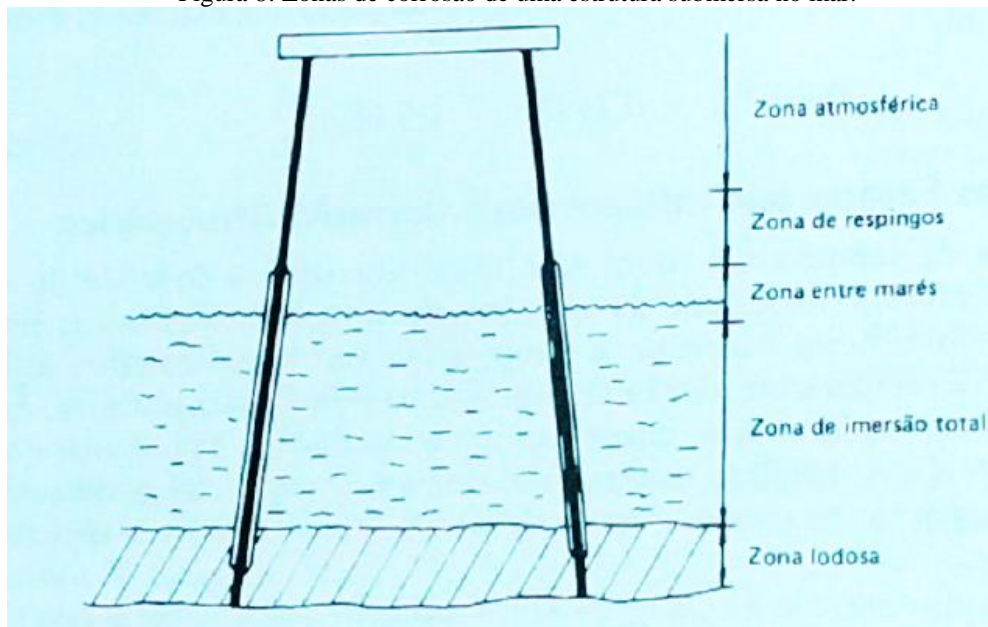
Cavitação; no caso de a pressão ambiente ser reduzida para a pressão de vapor de água do mar, ocorre a formação de bolhas de vapor que podem entrar em colapso e explodem, com o resultado da pressão de choque da explosão ocorre a ação mecânica sobre a superfície metálica onde há remoção de partículas metálicas.

Impingimento; alguns metais são sensíveis à velocidade da água do mar, entre eles o cobre e o aço carbono. A água em condição de turbulência faz com que bolhas de ar penetrem na água, e quando ocorre o choque contra a superfície metálica ocorre a destruição da película protetora e o metal pode ser atacado neste local. (GENTIL 2011).

Devido ao ambiente agressivo que prevalece no litoral os materiais de construção estão sujeitos a diferentes graus de corrosão esses níveis estão ligados diretamente a fatores como natureza do material, acabamento superficial, mas principalmente condições ambientais como temperatura, umidade, direção dos ventos etc. (ANEE 1999).

O ambiente marinho conforme ilustrado na Figura 8 pode ser dividido em cinco zonas de corrosão, sendo elas a atmosfera marinha, zona de respingo, faixa de variação das marés, submersa, lodo marinho. (LALGUDI 1990).

Figura 8: Zonas de corrosão de uma estrutura submersa no mar.



Fonte: LALGUDI, 1990

As posições das zonas dependem de sua localização e variação das marés, e da estabilidade do nível do mar, que tem variação dependendo de cada época do ano.

Na zona lodosa, a taxa de corrosão é baixa devido à pouca presença de oxigênio, porém há bactérias que produzem gases como o sulfídrico e amônia, no entanto com estes gases a corrosão é inexistente.

Na zona de imersão total há um acúmulo da fauna e da flora marinha havendo neste caso um grande crescimento de *fouling* (micro-organismos presentes na água do mar). Os *fouling* aderem na superfície do metal gerando uma colônia de bactérias que decompõem sulfato em sulfetos. Esse sulfeto em meio aquoso pode formar ácido sulfúrico, que reduz o pH do meio e consequentemente aumenta o potencial de corrosão, também pode reagir com o ferro formando o sulfeto de ferro que libera hidrogênio atômico que penetra no material gerando fragilização por hidrogênio. Na zona de imersão total também há grande presença de oxigênio, que varia com o aumento da profundidade, quanto mais fundo há diminuição da corrosão pela diminuição da concentração de oxigênio na água. Também há a diminuição na velocidade de escoamento da água do mar, tendo menos turbulência e menor criação de bolhas de ar na água que são responsáveis pela corrosão por cavitação. (ZUGNO 2015).

A zona das marés contém água do mar bem aerada na qual a superfície metálica está exposta a ação do oxigênio. Além disso, há formação de pilhas de aeração superficial, onde as áreas anódicas vão se deslocando com o sobe e desce das marés.

Na zona de respingos que expõem o metal a ondas e borrifos de água do mar. Essa zona é cerca de 60 cm acima da zona das marés altas e começa ao nível da água do mar na maré baixa. Nessa zona ocorrem diversos fatores de corrosão tais como: frequente umedecimento da superfície metálica, máxima difusão do oxigênio através de finas películas de umidade, e a ação mecânica das marés.

Na zona atmosférica há inúmeros fatores que propagam a corrosão, entre eles a exposição ao sol, chuva ácida, vento, névoa salina, substâncias poluentes, umidade relativa e o tempo de permanência do filme de eletrólito na superfície metálica. Além disso, há quantidade de sais, há umidade depositada, além da deposição de sólidos que reforçam o ataque da corrosão. Porém, chuvas frequentes reduzem a corrosão, pois lavam essa camada de resíduos da superfície metálica. (ZUGNO 2015).

Os sais que se encontram na água do mar são eletrófilos fortes, e aumentam a corrosão. O principal sal no ambiente marinho é o cloreto de sódio, mas se encontram também bicarbonato de cálcio e sulfato de magnésio que agem como inibidores catódicos. Na área catódica ocorre a formação de íons hidroxilas OH⁻, e o pH aumenta, formando compostos

insolúveis de carbonato de cálcio e hidróxido de magnésio. Se ocorrer o depósito desse material na superfície do metal pode se evitar o processo catódico e assim evitar a corrosão.

Para melhorar a durabilidade dos aços no ambiente marinho, utiliza-se o seguinte método de proteção á corrosão marinha: a proteção catódica através dos ânodos de sacrifício principalmente em plataformas de petróleo ou navios. Para zona de respingos e atmosférica o método mais empregado são os revestimentos (LALGUDI, 1990).

4. METODOLOGIA

4.1. ENSAIOS PARA QUALIFICAÇÃO DO REVESTIMENTO HALAR – ECTFE

Para comprovar o bom desempenho e a confiabilidade do revestimento anticorrosivo orgânico em aplicações altamente agressivas e de extrema responsabilidade, inúmeros testes com base no (programa de qualificação do revestimento HALAR) D-SMA/ING/SPF/TCNA-14-00047 foram estabelecidos como requisitos obrigatórios para sua qualificação.

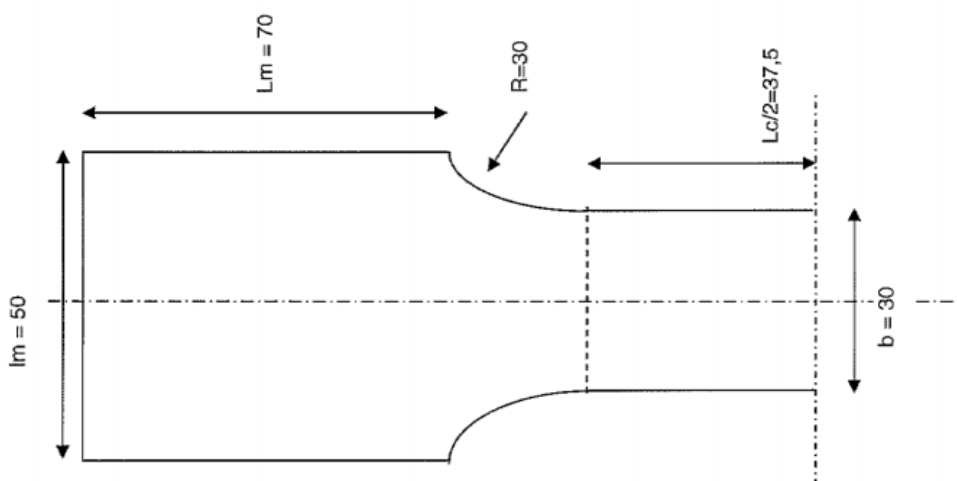
Os ensaios foram realizados em protótipos revestidos em conformidade com os mesmos que serão produzidos posteriormente em série, no entanto alguns ensaios também foram realizados em corpos de prova em escala reduzida, conforme descrito na sequencia.

O material utilizado para o revestimento dos corpos de prova como também para os protótipos foi o ECTFE (Etileno clorotrifluoroetileno) Halar® 6614 para a camada base (*primer*) e o Halar® 6014 para as camadas de acabamento (*top coat*), ambos da Solvay Solexis.

4.1.1. Ensaio de fadiga

Para a realização do ensaio de fadiga utilizou-se um corpo de prova conforme representado na Figura 9 com dimensões normalizadas de acordo com NF A 03-401.

Figura 9: Dimensões do corpo de prova de fadiga.



O revestimento orgânico foi aplicado conforme representado na Figura 10, ou seja, em apenas uma das faces do corpo de prova com o propósito de monitorar o surgimento de eventuais fissuras ao longo do ensaio. A espessura de película de revestimento aplicada ao corpo de prova foi de aproximadamente 500 μm .

Além da inspeção visual, testes de medição de espessura de acordo com a ASTM D6132 e verificação de porosidade conforme NACE SP0188 foram executados ao final do ensaio de fadiga.

Figura 10: Corpo de prova para ensaio de fadiga revestido



Os parâmetros utilizados para a realização do ensaio foram definidos conforme descritos abaixo:

- a) Carregamento do corpo de prova: 300 MPa (90 kN);
- b) Comportamento dos ciclos: Sinusoidal entre 2 e 90 kN;
- c) Frequência: 1,2 Hz
- d) Número de ciclos: 30.000

Antes da realização do ensaio de fadiga foi verificada a espessura do revestimento, conforme norma ISO 2808:2007, e a presença de descontinuidades, conforme norma ASTM D5162:2008.

A presença de descontinuidades foi verificada com o equipamento Elcometer® 266. Nenhuma falha no revestimento foi detectada quando o corpo-de-prova foi submetido a uma tensão de 3,9 kV.

O ensaio de fadiga foi realizado na máquina de ensaio servo-hidráulica MTS modelo 810, conforme procedimento, que foi elaborado com base na norma ASTM E466.

4.1.2. Ensaio de adesão

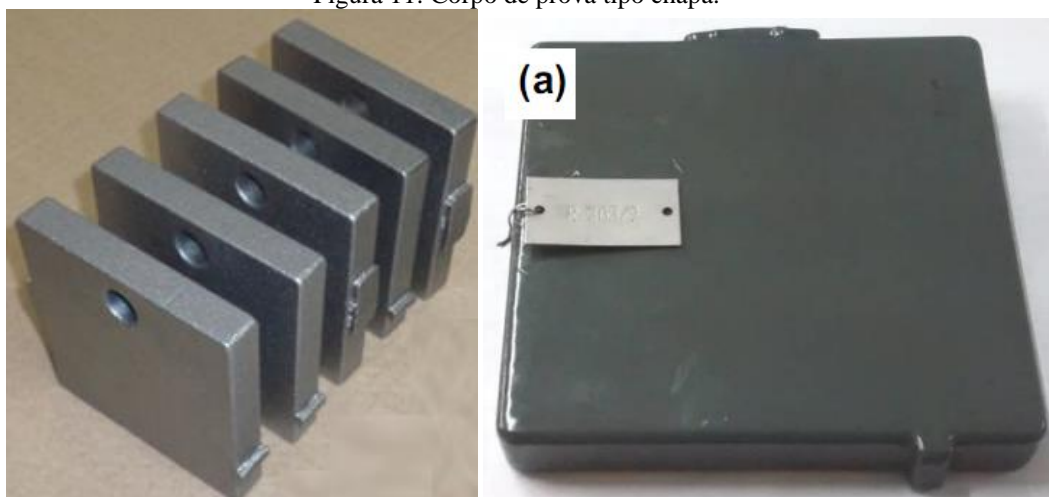
Os corpos de prova utilizados para a realização desse ensaio consistem em chapas planas com dimensões de 200 mm x 200 mm x 6 mm no material ASTM A572 ou ASTM A633 GrA conforme representados na Figura 11. As chapas foram totalmente revestidas, sendo que a espessura de camada aplicada para metade das chapas foi de $\geq 500 \mu\text{m}$ e para outra metade a espessura igual a 1000 μm totalizando 18 amostras.

Inicialmente as chapas foram submetidas ao ensaio de medição de espessura, o qual deve ser realizado conforme norma ISO 2808:2007. Na sequência a verificação de eventuais descontinuidades deve ser realizada de acordo com a norma ASTM D5162. Por fim um ensaio de aderência de acordo com a norma ISO 4624 deverá ser realizado para avaliar a resistência de aderência do revestimento entre o substrato e a ligação das camadas.

A realização e avaliação de cada ensaio listado anteriormente atender aos seguintes critérios abaixo:

- a) Nenhuma evidência de fissura ao longo da superfície revestida;
- b) Espessura de película de revestimento em conformidade;
- c) Ausência de falhas, poros, bolhas ao longo da superfície;
- d) Nível médio de ruptura para o ensaio de aderência deve ser maior que 20 MPa.

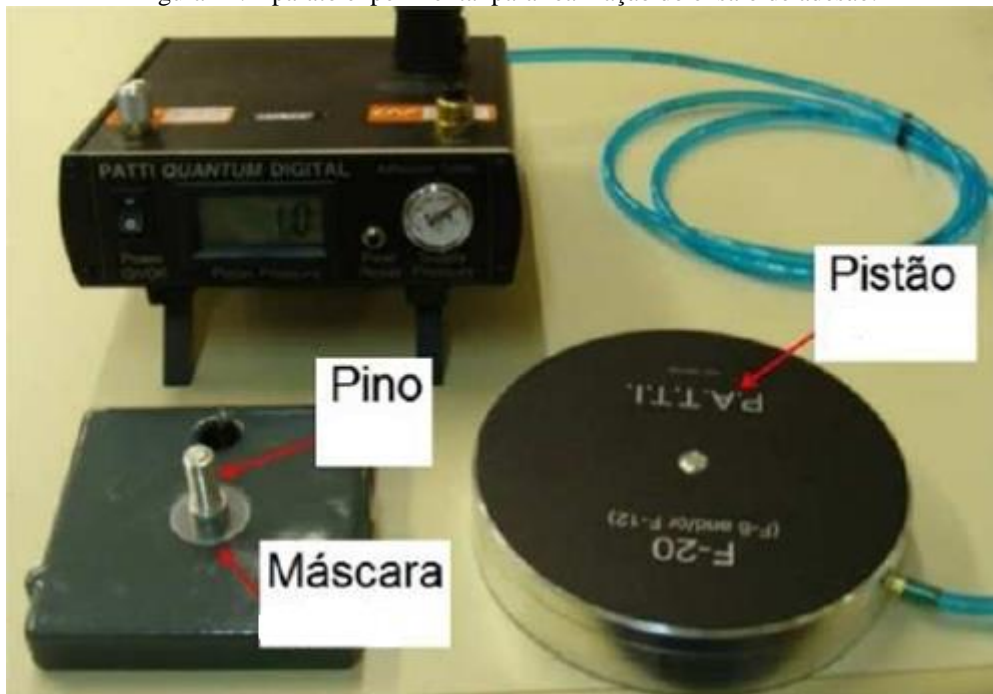
Figura 11: Corpo de prova tipo chapa.



Para realização dos ensaios, foi utilizado o equipamento Patti Quantum® Digital com pistões F8, F12 e F20 e pinos (dollies) de alumínio com diâmetro de $\frac{1}{2}$ polegada Figura 12.

Também foi utilizada uma máscara plástica para limitar a área de aplicação do adesivo e reduzir o seu acúmulo na borda do pino.

Figura 12: Aparato experimental para realização do ensaio de adesão.



Antes da realização do ensaio de adesão, foi verificada a espessura do revestimento. A presença de descontinuidades foi avaliada segundo a norma ASTM D5162:2008.

O ensaio de adesão seguiu norma ASTM D4541:2009, método de teste D. Como o copolímero de teste apresenta características antiaderentes, a primeira série de ensaios destinou-se ao teste de diversos adesivos que fossem capazes de aderirem adequadamente ao revestimento, sendo assim possível medir a aderência do revestimento ao substrato.

A mesma norma sugere que a superfície pode ser levemente lixada antes da colagem do pino desde que o revestimento não seja danificado. Por isso, diferentes graus abrasivos foram feitos na superfície antes da colagem dos pinos. As superfícies do pino e do revestimento foram limpas com acetona para evitar qualquer tipo de sujeira que poderia interferir no resultado da análise. Para calcular a tensão de arrancamento à tração foi utilizada a fórmula abaixo:

$$POTS = \frac{(BP \times Ag) - C}{Aps}$$

Onde:

POTS: Tensão de arrancamento (psi);

BP: Força de arrancamento registrada no equipamento (psi);

Ag: Área de contato entre a gaxeta e placa de reação (in²);

C: Constante do pistão fornecida pelo fabricante (lbs);

Aps: Área do pino (in²).

Posteriormente, o valor foi convertido de libra força por polegada quadrada (psi) para mega Pascal (MPa), multiplicando-se o valor encontrado por 0,00689. A tensão de arrancamento por tração para validação do revestimento deve ser igual ou maior a 20 MPa.

4.2. TESTES EM VÁLVULAS TIPO ESFERA (PROTÓTIPOS).

Para verificar o real comportamento do revestimento anticorrosivo orgânico Halar na aplicação em válvulas tipo esfera, protótipos foram utilizados para a realização de diversos ensaios que serão detalhados na sequência.

A válvula tipo esfera DN80 foi utilizada como protótipo, onde a aplicação do revestimento orgânico anticorrosivo Halar foi realizada. Como regra geral os componentes revestidos foram o corpo e a tampa da válvula esfera, limitadas apenas às regiões em que o fluido vai ter contato.

4.2.1. Ensaio de Ciclos de pressão

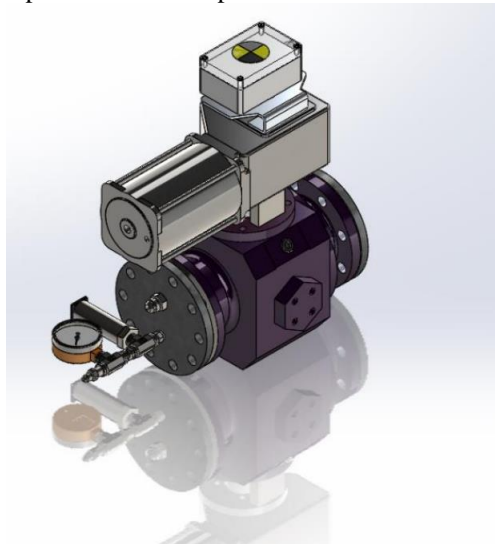
O ensaio de ciclos com tomadas de pressão foi realizado em um bunker, o qual é uma estrutura abaixo do nível do solo com paredes e piso de concreto e com uma tampa móvel de aço. Os protótipos são montados dentro do bunker, a tampa é fechada e todo o acionamento dos ensaios é feitos à distância para que o pessoal envolvido fique sempre em segurança.

Para realizar a vedação, montagem e ligação da mangueira de pressurização do sistema, foram fabricados flanges em aço carbono, nos quais foram empregadas junta de papelão hidráulico e um par de o-rings a montante e a jusante da válvula, respectivamente. A estanqueidade do sistema ocorreu com o uso de uma válvula de agulha na saída da mangueira do alimentador de fluido e uma válvula de esfera na entrada da mesma mangueira. Um manômetro analógico foi utilizado apenas para a inspeção visual da pressão, não aquisitando dados, conforme representado na Figura 13.

O monitoramento da pressão foi realizado pelo sistema de aquisição de dados constituído por um pressostato conectado ao flange da válvula. O sistema utilizado para o monitoramento e o controle dos ensaios foi um controlador tipo FlexTest para quatro canais de

controle marca MTS acoplado a um computador. Essa versão possibilita o monitoramento on-line, ou seja, os parâmetros como tempo de resposta e auto ajuste do controle são configurados durante o ensaio, permitindo uma maior confiabilidade.

Figura 13: Protótipo instrumentado para realizar ensaio de ciclo sobre pressão.



Conforme procedimento interno D-SMA/ING/SPF/TCNA-14-00047 a válvula deve permanecer semiaberta, ou seja, seu obturador deve estar a 45°. Dessa forma, tomadas de pressão de 0 a 45 bar devem ser executadas e os parâmetros de testes devem ser respeitados conforme descritos abaixo.

- a) Gradiente de pressurização de 5 bar/segundo;
- b) Despressurização de 10 bar/segundo;
- c) Número de ciclos: 35.000;
- d) Fluido água;
- e) Temperatura ambiente.

Após finalizar os ciclos de pressão, testes de vedações e acionamentos devem ser realizados com o intuito de verificar qualquer alteração na funcionalidade da válvula.

O ensaio de vazamento consiste em fechar a válvula, abrir seu respiro e monitorar possível vazamento. Caso a válvula apresentar vazamento, a quantidade de água que vazou deve ser medida. Após esse procedimento, o mesmo procedimento deve ser realizado no lado a jusante da válvula. Conforme procedimento interno da DCNS D-SMA/ING/SPF/TCNA-14-00047, o ensaio deve ocorrer à pressão constante de 52,5 bar (0 ; +5%), mantida por quinze minutos.

Em seguida a válvula deve ser desmontada e uma inspeção para verificar possíveis discontinuidades ao longo do revestimento deve ser realizada. A inspeção deve atender os requisitos estabelecidos na norma ASTM D5162.

4.2.2. Ensaio de Circulação sobre vazão

O ensaio de circulação com vazão controlada conforme procedimento interno D-SMA/ING/SPF/TCNA-14-00047 deve utilizar um fluido compatível com a água do mar a uma temperatura de 35°C. Dessa forma o fluido utilizado foi a água do mar sintética, fabricada de acordo com a norma ASTM D1141:2013. O sistema para a realização do ensaio consiste em um circuito fechado denominado de *Loopings*, conforme ilustrado na Figura 14.

Figura 14: Sistema de Loopings para ensaio de circulação sobre vazão.



A válvula deve permanecer totalmente aberta durante a circulação do fluido, sendo que ao longo do ensaio operações de acionamentos deverão ser executados, conforme descrito nos parâmetros de testes abaixo;

- a) Duração do teste: 360 horas (15 dias);
- b) Realizar 5 aberturas/fechamentos na ordem T0, 3°, 6°, 9° e 12° dias respectivamente;
- c) Vazão de 100 m³/hora.

Para atender à vazão solicitada de 100 m³/h foi necessário o uso de uma tubulação de aço de 4 polegadas de diâmetro, consequentemente, a velocidade de escoamento foi de 3,38m/s. Utilizado-se uma motobomba de 10 cv de potência (7,35 kW).

A vazão foi controlada por um inversor de frequência modelo CFW 700, fabricante WEG que ajustará a rotação da motobomba, e será registrada em um medidor de vazão magnético instalado permanentemente no sistema.

A temperatura do fluido deve estar em 35°C. Para garantir esse valor um sensor PT100 foi inserido no looping, de forma que ficasse diretamente em contato com o fluido interno. Esse sensor ficou conectado a um controlador Modelo N1040, Fabricante Novus, o qual foi conectado ao sistema de relés que controlava a temperatura do fluido através de um trocador de calor integrado no looping. Um segundo sensor PT100 foi inserido no fluido de maneira análoga, e conectado ao equipamento de aquisição de dados.

As operações de abertura e fechamento da válvula serão efetuadas automaticamente com o uso de um atuador pneumático.

Ao final do ensaio a válvula deve ser desmontada e uma inspeção para verificar possíveis discontinuidades ao longo do revestimento deve ser realizada. A mesma deve atender os requisitos estabelecidos na norma ASTM D5162.

4.2.3. Circulação com água arenosa

Conforme procedimento interno D-SMA/ING/SPF/TCNA-14-00047 o teste consiste em circular água com areia nas seções durante 6 semanas com 2.500 ciclos de aberturas e fechamentos por semana para cada seção. Os parâmetros de testes devem seguir a ordem conforme descrito abaixo:

- a) T0: início dos testes, válvulas na posição aberta;
- b) T0 + 1ª semana: 2.500 ciclos A/F;
- c) Manutenção em posição aberta entre as fases de 2.500 ciclos;
- d) T0 + 2ª semanas: 2.500 ciclos A/F;
- e) Manutenção em posição aberta entre as fases de 2.500 ciclos
- f) Em T0 + 6ª semanas, os 2.500 ciclos A/F completarão os 15.000 ciclos.

Para este ensaio será utilizado o mesmo sistema looping do teste de ciclo de vazão, com pequenas alterações para atender as especificações solicitadas.

Para atingir a velocidade de escoamento deste ensaio, os tubos ligados diretamente na válvula serão substituídos por tubos de 3 polegadas, forçando assim o aumento de velocidade de escoamento em atendimento a requisito, ou seja, 5 m/s. Além disso, para evitar uma sobrecarga excessiva na motobomba, a inclusão de uma ramificação nos mesmos tubos citados

com a inclusão de uma válvula de alívio que será acionada quando o sistema atingir 3 bar durante o fechamento da válvula.

A pressão interna prevista para o funcionamento deste *looping* com a válvula aberta é de 0,6 bar. Por este ensaio ser em temperatura ambiente, será retirado o sistema de aquecimento, conforme representado na Figura 15.

A água será carregada com areia à razão de 1% em massa. A escolha da granulometria não foi especificada, porém a decisão foi tomada levando-se em conta um valor intermediário. A velocidade do fluido deve permanecer constante, $V = 5 \text{ m/s}$. O circuito não será pressurizado.

Ao final do ensaio a válvula deve passar pelo teste de pressão e a taxa de vazamento deve ser avaliada. Após a válvula deve ser desmontada e uma inspeção para verificar possíveis discontinuidades ao longo do revestimento deve ser realizada. A mesma deve atender os requisitos estabelecidos na norma ASTM D5162.

Figura 15: Sistema de Loopings para ensaio de circulação c/ água arenosa



4.2.4. Ensaio de corrosão

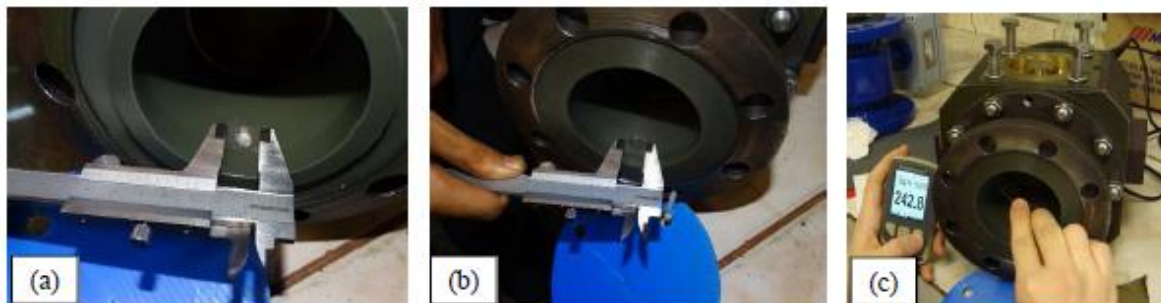
Conforme documento D-SMA/ING/SPF/TCNA-14-00047, o ensaio de corrosão foi dividido em duas etapas, a primeira teve a duração de 2 meses o qual consiste em circular um

fluido compatível com a água do mar a uma temperatura de 35°C pelas seções, com a realização de 6 ciclos de abertura e fechamento diários. A segunda etapa será realizada durante um período de 3 meses onde a circulação do fluido em apenas uma das seções será realizada perante eminência de defeitos realizados propositalmente no protótipo.

Os defeitos pontuais sobre o revestimento orgânico, Figura 16, devem ser realizados na passagem da válvula um em cada extremidade da seguinte forma:

- a) Primeiro defeito: descascando-se a pintura sem atingir o metal.
- b) Segundo defeito: remover as camadas de revestimento até a aparição do metal.

Figura 16: (a) defeito passante a montante da válvula; (b) defeito superficial a jusante da válvula; (c) medição de espessura remanescente no defeito superficial.



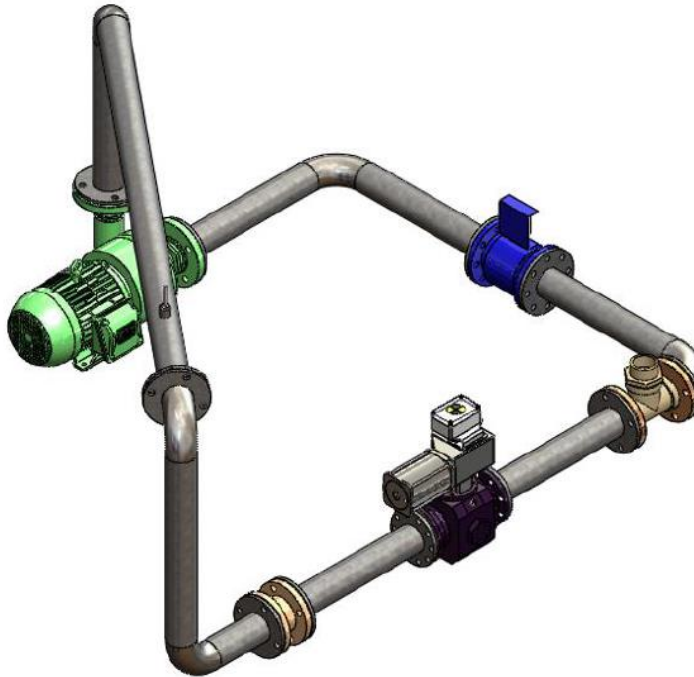
Para a realização desse ensaio foram utilizados dois sistemas de *Loopings* o quais os protótipos serão inseridos, os mesmos operaram em paralelo.

A geometria e os acessórios são semelhantes ao teste de ciclo de vazão, com a diferença de que a tubulação será de 3 polegadas em aço galvanizado para possibilitar a medição da corrente e potencial de corrosão e as motobombas centrífuga de 3,7 kW de potência, Modelo MSA-21 R 1 ½, Fabricante Schneider, utilizada para promover a circulação de fluido no interior do looping.

Para o controle da rotação da motobomba, cada looping utilizou um conversor de frequência, Modelo NDRV 20, Fabricante Novus, de modo que a vazão requerida no ensaio seja mantida com precisão. Tal vazão é lida em um medidor de vazão eletromagnético instalado em cada looping, Modelo VMF075, Fabricante Incontrol®.

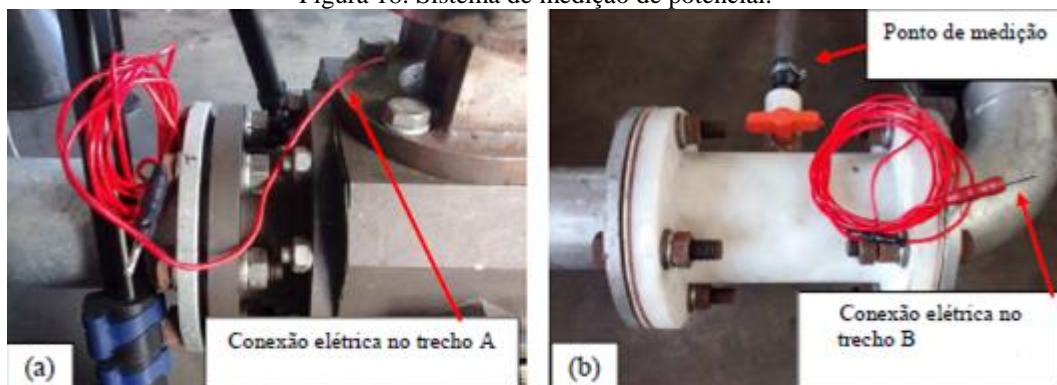
Em posições afastadas em 500 milímetros, tanto a jusante como a montante da válvula, foram inseridos tubos flangeados de pequeno comprimento (em forma de carretéis), fabricados pelo polímero de engenharia polioximetileno, conhecido como poliacetal, para promover o isolamento elétrico no sistema. Esse isolamento é necessário para medição do potencial de corrosão, conforme ilustrado na Figura 17.

Figura 17: Sistema de Loopings para ensaio de corrosão



O potencial de corrosão deve ser medido com a motobomba desligada, pois o movimento do fluido interno pode causar interferência. Esse procedimento é realizado em relação a um eletrodo de referência inserido em uma ramificação da tubulação, localizada em um dos isolamentos poliméricos, habilitada apenas no momento da medição através de uma válvula de esfera de PVC, conforme ilustrado na Figura 18. O eletrodo de referência é regularmente checado contra outro eletrodo de referência, garantindo assim a confiabilidade da medida. A corrente de corrosão entre a válvula e a tubulação deve ser medida com o fluido interno em deslocamento na sua velocidade nominal. As medições de corrosão foram realizadas com o uso de um multímetro digital.

Figura 18: Sistema de medição de potencial.



A velocidade de circulação da água do mar sintética deverá ser próxima de 3 m/s.

Os parâmetros a serem verificados e registrados durante o período de teste serão listados abaixo.

- a) Medições de corrente entre os tubos e a válvula;
- b) Medições de potencial nas punções dos tubos;
- c) Medições realizadas uma vez ao dia;

Ao final do ensaio a válvula deve ser desmontada e uma inspeção para verificar o nível de corrosão ao longo do revestimento deve ser realizada.

4.2.5. Equipamentos gerais para a realização do ensaio

As operações de fechamento e abertura da válvula foram efetuadas por um atuador pneumático fornecido pela empresa Micromazza. O controle de tais operações foi realizado por um Controlador Lógico Programável (CLP), fornecido também pela empresa, no qual algumas modificações foram feitas para que pudesse operar exatamente como o necessário. A programação do CLP foi elaborada pelo LAMEF. Um manômetro analógico com escala de zero a dez bar, fabricante Balflex, também foi adicionado no looping para a verificação da variação da pressão interna durante essas operações da válvula.

A aquisição dos dados de temperatura, vazão e operações da válvula, dados de interesse do ensaio, foi realizada por um módulo de aquisição e registro de dados modelo *FieldLogger*, fabricante Novus. Este aparelho permite o acompanhamento remoto dos dados, sendo possíveis rápidas intervenções em caso de situações não programadas.

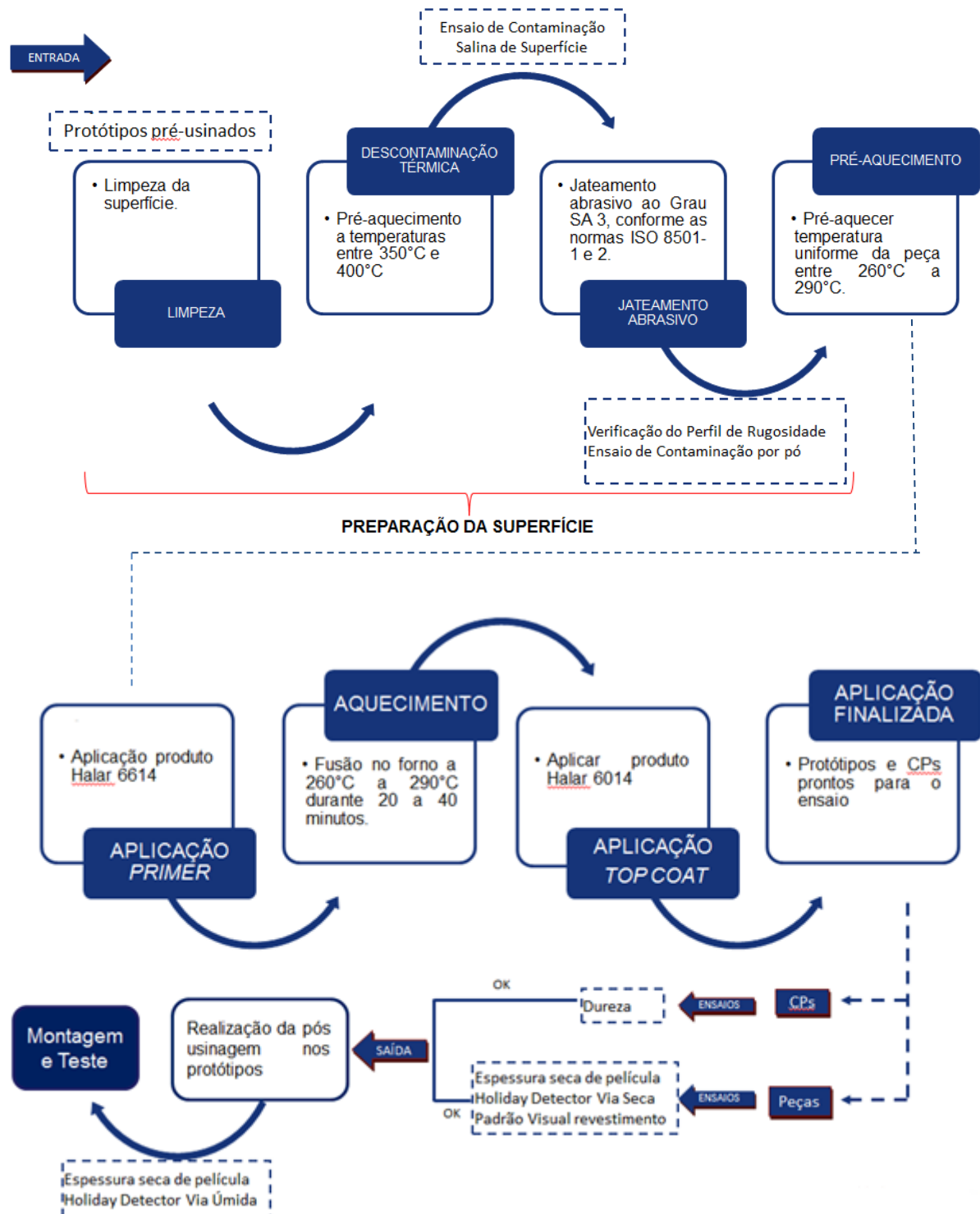
Um trocador de calor também foi utilizado onde o mesmo recebia água refrigerada por um módulo de refrigeração, Modelo TCW 7.5, Fabricante J.C. Moreira. O fluido de refrigeração não entrava em contato com o fluido interno do looping, ocorrendo a refrigeração de maneira indireta, retirando calor do fluido interno pelo resfriamento da parede do tubo de uma parte da tubulação.

4.3. PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA E PROTÓTIPOS

Para a realização dos testes práticos foram fabricados 3 protótipos, além de corpos de provas conforme descritos anteriormente. Todas as etapas de aplicação do revestimento orgânico foram executadas conforme o fluxo de operações apresentado na Figura 19 em

conformidade com o procedimento interno Micromazza para a aplicação do revestimento orgânico.

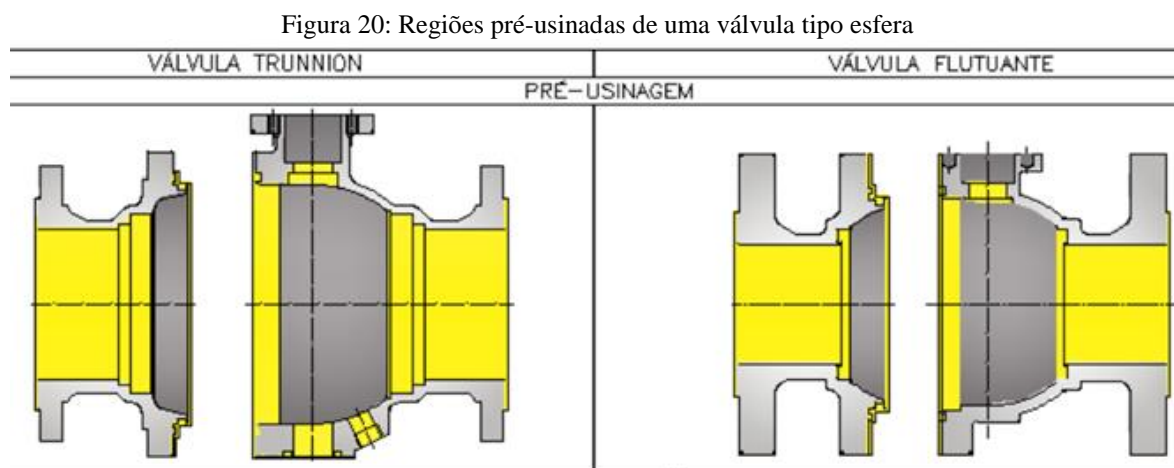
Figura 19: Etapas da aplicação do revestimento orgânico.



Fonte: Arquivo Micromazza, 2015

4.3.1. Pré-usinagem dos protótipos

A pré-usinagem dos protótipos é a etapa inicial do processo de revestimento orgânico sendo está a operação que define o valor de espessura nas regiões usinadas e de encaixe da válvula. Após a pré-usinagem é realizado uma inspeção dimensional nos componentes a fim de garantir que as medidas de projeto sejam alcançadas após a aplicação do revestimento e usinagem final. A Figura 20 ilustra as regiões de uma válvula tipo esfera que passam pelo processo de pré-usinagem para posteriormente receber a aplicação do revestimento anticorrosivo orgânico.



4.3.2. Limpeza e Descontaminação Térmica

A primeira etapa da preparação de superfície é a limpeza a qual é realizada pela técnica da descontaminação térmica a fim de garantir que o substrato que irá receber o revestimento orgânico esteja livre de graxa, óleo, rebarba e demais materiais estranhos.

O processo de descontaminação térmica, consiste em aquecer a peça a uma temperatura entre 350-400°C por um período mínimo de 2 h, com o intuito de eliminar qualquer tipo de contaminante presentes na superfície. Os parâmetros para a realização do processo de descontaminação térmica segue as recomendações da NACE 6G, 1994.

A Figura 21 (a) e (b) ilustra o equipamento utilizado para o processo de descontaminação térmica aplicado aos protótipos e corpos de prova.

Figura 21: Equipamento utilizado para o processo de descontaminação térmica



Fonte: Arquivo Micromazza, 2015.

Para garantir que a superfície a ser revestida apresente uma uniformidade, cantos vivos, arestas e irregularidades devem ser removidos por meio de esmerilhamento, lixamento manual ou através do próprio processo de usinagem conforme definido na norma (NACE SP0178, 2007).

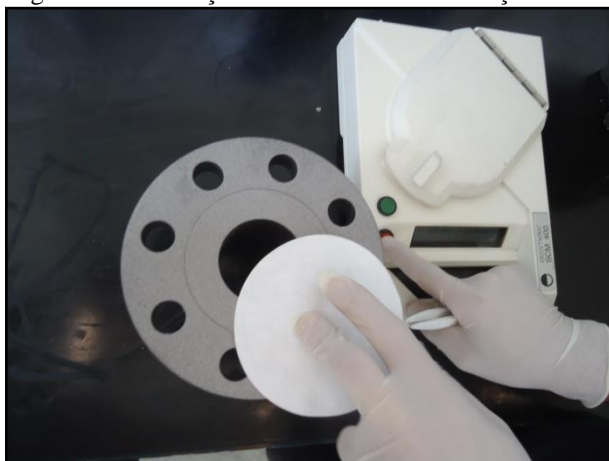
4.3.2.1. Ensaio de Contaminação Salina

Após a descontaminação térmica deve-se realizar o primeiro ensaio, que tem como objetivo verificar o teor de sais presentes na superfície das peças. O ensaio de contaminação salina conforme, ilustrado na Figura 22, é realizado com aparelho SCM400 Elcometer 130 (*Salt Contamination Meter*), conforme procedimento baseado na norma (NACE 5, 2002). O valor máximo de contaminantes admitidos é de $2 \mu\text{g}/\text{cm}^2$. (ET-940-PEN-006, Rev. D - 2012).

A realização desse ensaio é de fundamental importância, para garantir que a aderência do revestimento ao substrato não apresente problemas futuros. A explicação para esse ensaio está relacionada diretamente com o fenômeno da osmose, a qual apresenta a seguinte definição: a água movimenta-se sempre de um meio menos concentrado para um meio mais concentrado com o objetivo de atingir a mesma concentração em ambos os meios.

Dessa forma, se a superfície analisada apresentar valores de salinidade acima do especificado, o fenômeno pode ocorrer e o surgimento de bolhas ao longo do revestimento será a consequência.

Figura 22: Realização de ensaio de contaminação salina.



Fonte: Arquivo Micromazza, 2015.

Em caso de resultados acima do permissível, uma lavagem com água pura deve ser realizada, e o processo de descontaminação térmica deve ser refeito.

4.3.3. Jateamento abrasivo

Na sequência as peças são encaminhadas para o processo de jateamento abrasivo no qual é utilizado um jato rotativo automático, conforme representado na Figura 23 (a) e (b). A granalha utilizada é constituída de aço angular e esférica.

A principal finalidade dessa etapa é gerar um perfil de rugosidade adequando para que a ancoragem do revestimento orgânico ao substrato apresente uma elevada resistência mecânica, além disso o jateamento tem a função de eliminar todo o tipo de impureza, afim de garantir uma superfície apropriada para aplicação do revestimento orgânico.

Após retirar as peças do jato, as mesmas devem passar por uma limpeza manual para remover o excesso de poeira proveniente do processo de jateamento abrasivo. Esse procedimento pode ser realizado com o auxílio do ar comprimido, devidamente equipado com filtros, que fornecem um ar limpo, seco e isento de qualquer contaminante. Para auxiliar na remoção dessas partículas é permitido a utilização da escova de nylon, e todo o manuseio deve ser realizado com luvas para evitar a contaminação devido ao contato direto com a superfície a ser revestida.

Figura 23: Equipamento utilizado para o processo de jateamento abrasivo.



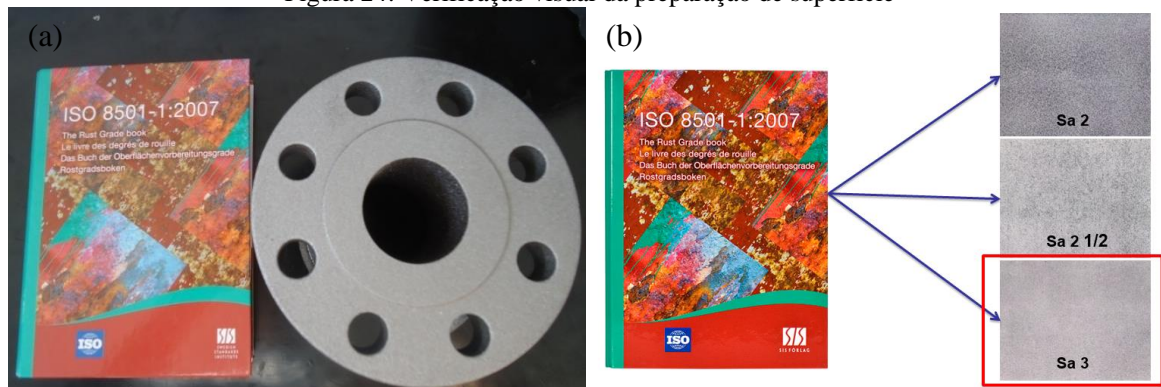
Fonte: Arquivo Micromazza, 2015.

4.3.3.1. Verificação Visual do Preparo da Superfície

A verificação visual da preparação de superfície após jateamento abrasivo consiste em analisar visualmente se a superfície apresenta condições adequadas para receber a aplicação do revestimento orgânico.

O procedimento de avaliação adotado é realizado de forma comparativa entre a aparência do substrato obtido pelo jateamento e as imagens de classificação descritas na norma ISO 8501-1, 2007. Conforme especificação técnica (ET-940-PEN-006, Rev. D - 2012), a superfície jateada deve atender no mínimo a imagem designada como Sa 3 da ISO 8501-1, considerado jateamento abrasivo ao metal quase branco conforme ilustrado na Figura 24 (a) e (b).

Figura 24: Verificação visual da preparação de superfície



Fonte: Arquivo Micromazza, 2015.

4.3.3.2. Verificação do perfil de rugosidade

A verificação do perfil de rugosidade é de fundamental importância para a aplicação do revestimento orgânico, pois é ele que vai proporcionar a ancoragem do revestimento ao substrato garantido assim a resistência mecânica adequada. O equipamento utilizado para a realização desse ensaio é o medidor de rugosidade analógico tipo agulha, marca Elcometer, modelo E123, escala de medição de 0 a 1000 μm , resolução de 2 μm conforme ilustrado na Figura 25.

Figura 25: Medição do perfil de rugosidade.



Fonte: Arquivo Micromazza, 2015.

O procedimento de medição é realizado conforme parâmetros estabelecidos pela norma (NBR 15488, 2007). Esse método de medição é considerável rápido e confiável, porém é limitado a superfícies planas. Caso a geometria das peças impossibilita a realização da medição torna-se necessário a preparação junto às peças de corpos de prova.

Os valores de rugosidade devem estar compreendidos entre 50-100 μm conforme N13, Ver.K – 2012.

Para atender ao perfil de rugosidade solicitado é necessário avaliar os parâmetros como tipo e tamanho do abrasivo em relação ao perfil máximo a ser alcançado, conforme apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Perfil de rugosidade obtido em função do abrasivo.

Abrasivo	Tamanho máximo da partícula que atravessa peneira		Altura máxima do perfil (μm)
	Abertura, mm	Nota 1	
Areia:			
fina	0,4	40	50
média	1,0	18	65
grossa	1,7	12	70
Granalha de aço [partículas angulosas (ver Nota 2)]:			
Nº 40 - G 80	0,4	40	60
Nº 25 - G 50	0,7	25	85
Nº 18 - G 40	1,0	18	90
Nº 16 - G 25	1,2	16	100
Granalha de aço [esférulas (ver Nota 2)]			
Nº S-110	0,6	30	50
Nº S-230	1,0	18	80
Nº S-280	1,2	16	90
Nº S-330	1,4	14	95
NOTA 1 Refere-se a peneiras conforme especificação da ASTM E 11. NOTA2 De acordo com a SAE RP J-444a.			

Fonte: Norma Petrobras N9, (2010)

4.3.3.3. Ensaio de Contaminação por Pó

A presença de partículas a níveis elevados sobre a superfície metálica a ser revestida pode vir a prejudicar na aderência e conseqüentemente na qualidade e no desempenho do revestimento orgânico. Dessa forma o ensaio de contaminação por pó torna-se de fundamental importância, o qual deve ser realizado conforme procedimento baseado na norma ISO 8502-3, 1992.

O ensaio é realizado de forma comparativa com os padrões visuais apresentados na norma mencionada e ilustrada na Figura 26. O procedimento de ensaio consiste em aderir uma fita adesiva à superfície da peça e em seguida a mesma é removida e alocada em uma folha de papel branca, permitindo dessa forma realizar o comparativo com os padrões normalizados. O critério de aceitação máximo permitido para a quantidade de pó não deve exceder ao indicado no grau 2.

Figura 26: Graus de comparação – Contaminação por pó.

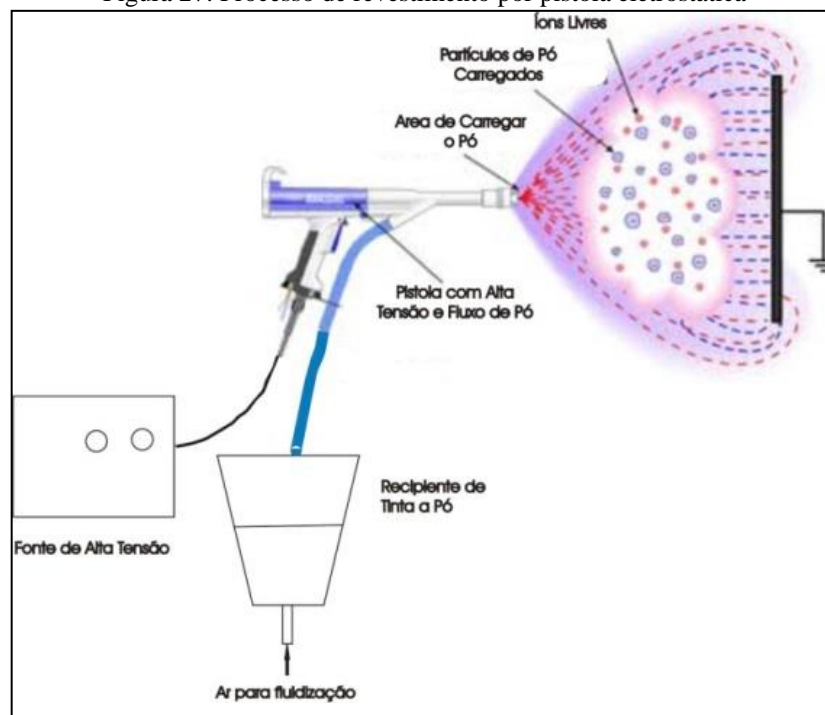
	1
	2
	3
	4
	5

Fonte: ISO 8502-3, (1992)

4.3.4. Aplicação do Revestimento

O processo de aplicação do revestimento orgânico conforme especificações técnicas (DR-ENGP-1, 2010) e (ET-940-PEN-006, Rev. D - 2012), deve ser realizado por meio de um equipamento de pulverização eletrostático. A metodologia de funcionamento consiste na aplicação de uma carga eletrostática às partículas de pó, as quais são atraídas pela peça que está aterrada, conforme ilustrado na Figura 27.

Figura 27: Processo de revestimento por pistola eletrostática



Fonte: (KMW, 2013), (DEVILBISS, 2013)

O equipamento de aplicação eletrostática é alimentado por meio do sistema de ar comprimido, o qual deve conter filtros separadores para garantir que o ar esteja seco e evitar a contaminação por meio de água, óleo e eventuais impurezas que podem vir a prejudicar o revestimento.

Outro fator que deve ser observado são as condições ambientais. Conforme a especificação técnica (ET-940-PEN-006, Rev. D - 2012), o local onde é realizada a aplicação do revestimento deve apresentar controle da umidade relativa do ar (UR) sendo máxima de 85% e controle de temperatura mínima da superfície, que deve ser de 3 °C acima do ponto de orvalho. Esses parâmetros podem interferir diretamente nas propriedades do revestimento.

4.3.4.1. Aplicação do *Primer*

A aplicação do ECTFE (Halar 6614 – *Primer*) é considerada a primeira camada de revestimento, a qual é responsável pela aderência ao substrato. Inicialmente a peça é aquecida em uma estufa linear a uma temperatura de 260-290 °C por um período suficiente para homogeneizar a temperatura em toda a superfície, normalmente, de 20 a 30 minutos. Após o aquecimento, as peças são direcionadas para a área de aplicação e por meio de pintura eletrostática (EPC – *Electrostatic Powder Coating*) uma camada de aproximadamente 150µm é aplicada conforme ilustrado na Figura 28.

Após a aplicação, as peças retornam ao forno por um período de 20 a 40 minutos para a realização da cura do *Primer*.

Figura 28: Aplicação do ECTFE (Halar 6614 – *Primer*)



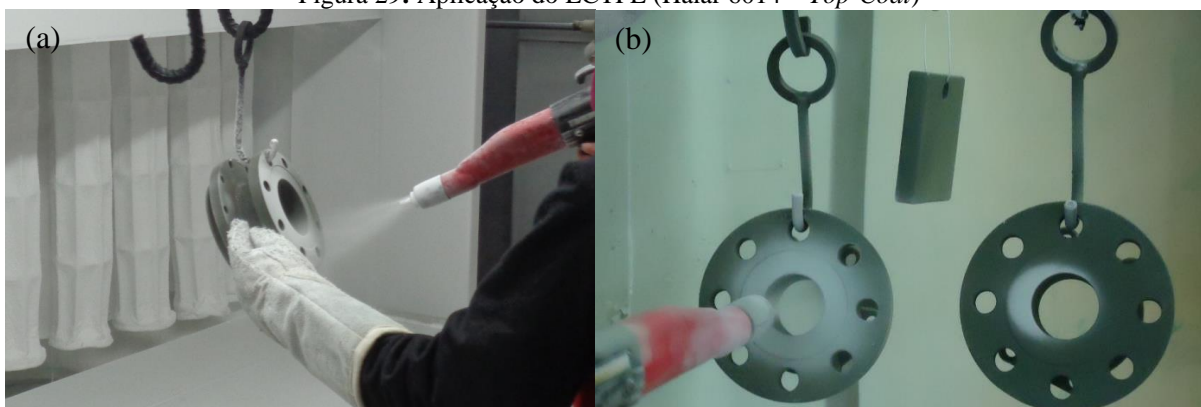
Fonte: Arquivo Micromazza, 2015.

4.3.4.2. Aplicação do *Top Coat*

Após o período de cura e com a temperatura estabilizada, inicia-se o processo de aplicação do ECTFE (Halar 6014 – *Top-Coat*). Várias seções de aplicações são realizadas para atingir a espessura final de aproximadamente 1000 μ m. Para toda a demão aplicada as peças devem retornar ao forno para que a temperatura seja equalizada, permitindo assim a boa adesão entre as camadas.

As cabines onde é realizada a aplicação do revestimento conforme ilustrado Figura 29 (a) e (b) são munidas de filtros exaustores que removem o acesso de material aplicado proporcionando uma aplicação mais uniforme e um ambiente de trabalho mais limpo e agradável.

Figura 29: Aplicação do ECTFE (Halar 6014 – *Top-Coat*)



Fonte: Arquivo Micromazza, 2015.

Toda a movimentação das peças para a realização da aplicação do revestimento é automatizada, para evitar o contato e o manuseio que poderiam vir a contaminar e provocar eventuais defeitos ao revestimento. A aparência brilhante e lisa das peças é o que determina se o processo de aplicação foi realizado de forma adequada.

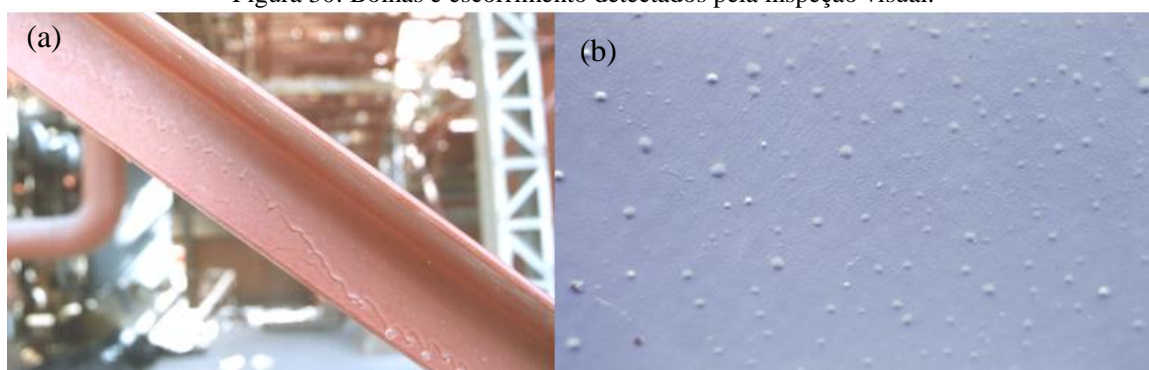
4.3.5. Controle de qualidade do revestimento

Ao final da aplicação do revestimento orgânico, vários ensaios foram realizados para comprovar a qualidade e o bom desempenho do mesmo, com o objetivo de prevenir eventuais falhas prematuras. Cada ensaio solicitado pela especificação técnica (ET-940-PEN-006, Rev. D - 2012), será detalhado a seguir.

4.3.5.1. Verificação Visual do Revestimento

A inspeção visual deve ser realizada conforme solicitado na especificação técnica (ET-940-PEN-006, Rev. D - 2012), (SOLVAY SOLEXIS, 2009). A verificação deve ser realizada em toda a superfície revestida, sendo que a mesma não deve apresentar cor e aparência não uniformes, bolhas, escorrimento, entalhes, rasgos, aspereza, formação de espuma ou qualquer outro defeito que possa afetar o desempenho do revestimento, conforme representado na Figura 30 (a) e (b).

Figura 30: Bolhas e escorrimento detectados pela inspeção visual.



Fonte: Arquivo Micromazza, 2015.

4.3.5.2. Ensaio de Medição de Espessura do Revestimento

A realização desse ensaio tem como objetivo verificar a espessura da película seca total do revestimento orgânico aplicado em atendimento à especificação técnica (ET-940-PEN-006, Rev. D - 2012), a qual define como valor ideal 400 a 600 μ m. A medição de espessura deve ser executada em 12 pontos aleatórios espaçados uniformemente, conforme norma (NBR 10443, 2008) método B.

O equipamento utilizado para a realização da verificação da espessura de película seca é denominado medidor de espessura marca Elcometer, modelo 456, escala de medição de até 30mm, resolução de 1 μ m e um jogo de películas padrão para ajuste do equipamento, conforme ilustrado na Figura 31 (a) e (b).

Figura 31: Ajuste do equipamento e medição de espessura de película seca.



Fonte: Arquivo Micromazza, 2015.

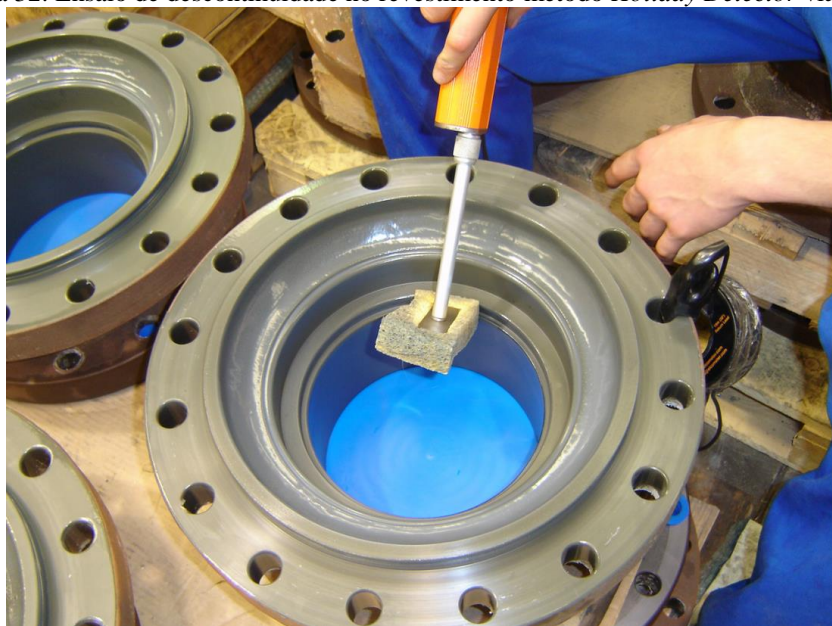
4.3.5.3. Ensaio de Verificação de Descontinuidade

O ensaio de descontinuidade é realizado com o intuito de encontrar possíveis falhas ao longo da superfície revestida, para garantir a integridade total da mesma. Conforme critério de aceitação nenhuma descontinuidade deve ser aceita.

Para garantir a eficácia do ensaio, o mesmo é dividido em dois métodos e em duas etapas, ou seja, ensaio de descontinuidade via seca realizado antes da pré-usinagem final e via úmida executado na pós-usinagem final. A utilização de dois métodos diferentes está atrelada a espessura do revestimento sendo a técnica via seca para espessuras maiores e via úmida para a medição de camada menores obtidas após a usinagem final.

Todo o procedimento de ensaio é realizado conforme os parâmetros definidos pelas normas NACE SP0188, 2006 E N-2137, 2007. O equipamento utilizado para a realização do ensaio via seca é o *Holiday Detector*, marca Elcometer, modelo 266 e para via úmida é o *Pinhole Detector*, marca Elcometer, modelo 270, conforme ilustrado respectivamente na Figura 32.

Figura 32: Ensaio de descontinuidade no revestimento método *Holiday Detector* via úmida.



Fonte: Arquivo Micromazza, 2015.

4.3.5.4. Ensaio de Medição de Dureza do Revestimento

O ensaio de dureza é realizado conforme critérios e procedimento definidos pela norma ASTM D2240, 2010. O equipamento utilizado na medição é um durômetro Shore D, marca Pantec, capacidade de medição 0–100 Shore D, resolução 1 Shore D, conforme ilustrado na Figura 33.

O valor mínimo de dureza é medido em um corpo de prova com medidas normalizadas e revestido junta às peças é de 75 ShoreD.

A verificação do valor de dureza tem grande importância, devido à eventual presença de sólidos em suspensão, que podem vir a danificar o revestimento caso o valor de dureza esteja abaixo do especificado.

Figura 33: Medição de dureza do revestimento.



Fonte: Arquivo Micromazza, 2015.

4.3.6. Usinagem Final Pós-Revestimento

Após a aplicação do revestimento orgânico e a realização de todos os ensaios apresentados, as peças são direcionadas para a usinagem final, conforme ilustrado na Figura 34, ou seja, o excesso de revestimento é removido em atendimento às dimensões de projeto, para possibilitar o normal procedimento de montagem da válvula.

Como regra geral em atendimento às especificações do processo produtivo todos os componentes após a usinagem final passam pelo controle dimensional. Além disso, a medição de espessura e a verificação de descontinuidades utilizando *Holiday Detector* via úmida é um critério obrigatório exigido pelo procedimento de aplicação de revestimento orgânico.

Figura 34: Usinagem final do pós revestimento



Fonte: Arquivo Micromazza, 2015.

4.3.7. Montagem e Testes de Vedação

A montagem das válvulas revestidas segue o mesmo procedimento da montagem normal, porém um cuidado maior com as peças revestidas deve ser tomado para evitar eventuais batidas que podem vir a comprometer o revestimento.

Após a montagem, a válvula é encaminhada para os testes de vedação, onde sua funcionalidade é verificada. Os ensaios executados nessa etapa são testes de pressão e de acionamento, conforme critérios estabelecidos pelas normas API 6D, 2008 e ASME B16.34, 2009. Os testes são realizados conforme sequência apresentada na Tabela 7.

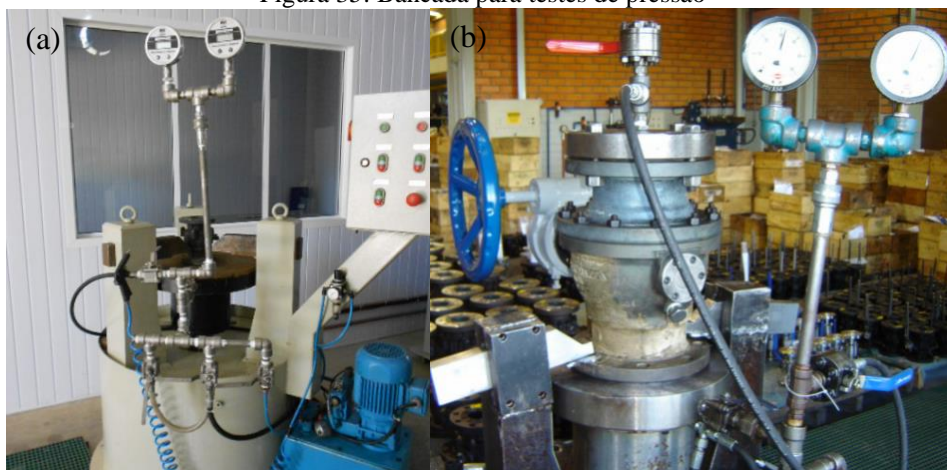
Todos os ensaios são realizados em bancadas de teste, conforme ilustrado na Figura 35, (a) e (b) sendo que o critério de aprovação para os ensaios de vedação deve ser SVV (Sem Vazamento Visível) durante todo o período de ensaio.

Tabela 7: Sequência de testes de vedação.

ETAPA	TESTE	DESCRIÇÃO O ENSAIO
1°	Hidrostático do Corpo	Pressão hidrostática em toda a válvula
2°	Hidrostático da Sede	Pressão hidrostática em ambas as sedes
3°	Pneumático da Sede	Pressão Pneumática em ambas as sedes
4°	Alívio de Cavidade	Aliviar com no máximo 1,33 vezes a PMT
5°	Torque de acionamento	Levantamento de curva de torque de acionamento

Fonte: Arquivo Micromazza, 2015.

Figura 35: Bancada para testes de pressão



Fonte: Arquivo Micromazza, 2015.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados e discussões referentes aos ensaios de ciclos de pressão, circulação sobre vazão, circulação de água arenosa, ensaio de corrosão, ensaio de adesão e ensaio de fadiga realizados com o objetivo de avaliar o desempenho do revestimento anticorrosivo orgânico ECTFE.

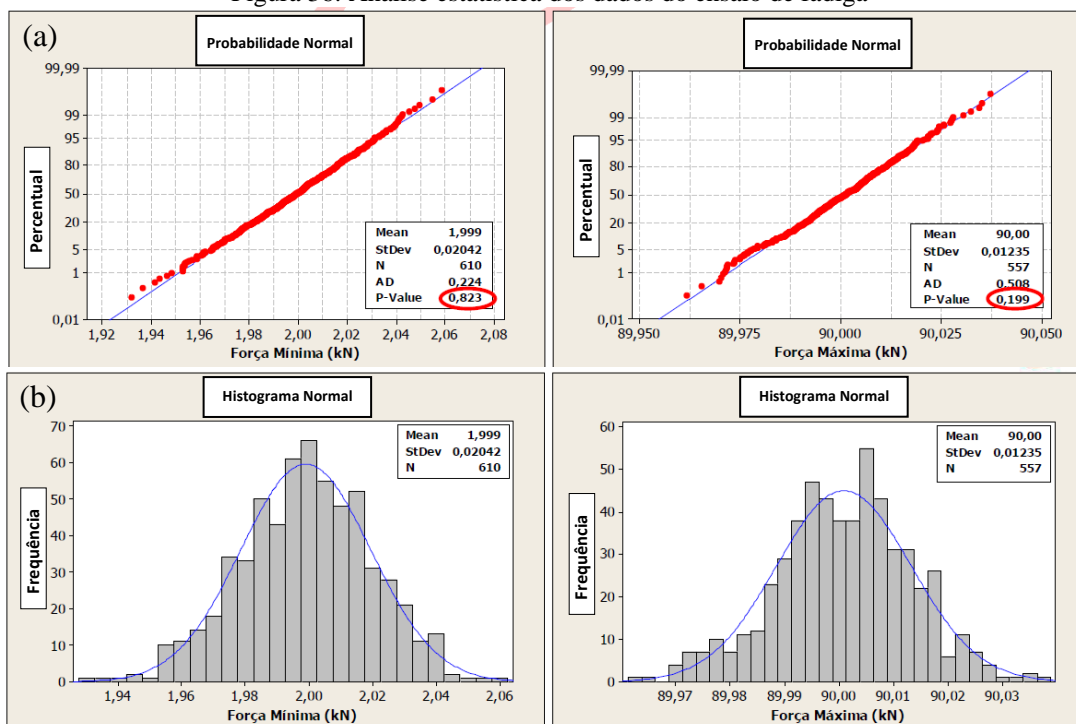
5.1. ENSAIOS EM CORPOS DE PROVA

5.1.1. Ensaio de Fadiga

A espessura da camada foi medida com o equipamento PosiTector® 6000 Advanced. Foram medidos 9 pontos, sendo 5 pontos na região do pescoço, apresentando espessura média de 704,9 μm com desvio padrão de 51,08 μm .

A Figura 36 (a) e (b), apresenta uma análise estatística do número de ciclos registrados durante o ensaio de fadiga. Tanto a carga mínima como a carga máxima apresentaram uma distribuição normal, já que o valor de P-Value foi maior que 0,05, portanto a confiabilidade dos dados é de 95 %. A carga mínima média aplicada foi de 1,999 kN com desvio padrão de 0,02042 kN e a carga máxima média foi de 90,00 kN com desvio padrão de 0,01235 kN.

Figura 36: Análise estatística dos dados do ensaio de fadiga



Após o ensaio de fadiga o corpo-de-prova foi novamente inspecionado. Visualmente não foram observadas trincas, bolhas e/ou descolamentos no revestimento Figura 37, o que foi confirmado via equipamento Elcometer® 266 aplicando-se a tensão de 3.9 kV. A espessura média do revestimento foi de 707,5 μm com desvio padrão de 50,50 μm . Também é possível observar na Figura 37 as marcas das garras de fixação e o descolamento do revestimento que já estava presente na amostra antes do ensaio.

Figura 37: Corpo-de-prova após ensaio de fadiga.



5.1.2. Ensaio de Adesão

Foram testados seis adesivos, sendo cinco bi-componentes e um monocomponente, com distintos tempos de cura. Nos adesivos bi componentes, a mistura das partes foi realizada conforme as orientações dos seus fabricantes. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 8 identificados pelos códigos R 305/2, R 305/3, R 305/4, R 305/5, R 305/6, R 305/7, R 305/8, R 305/9, R 305/10, R 305/6, R 305/8 e R 305/10.

Em todos os ensaios realizados, as falhas ocorreram nos adesivos utilizados, isto é, em nenhum dos casos houve descolamento do revestimento ou a formação de trincas e/ou bolhas. A maior tensão de arrancamento à tração alcançada foi de 13,2 MPa, portanto, nenhum adesivo utilizado foi capaz de alcançar a tensão de tração mínima exigida para esse teste antes da sua falha. A observação em lupa de baixo aumento da região deste ensaio evidencia que a falha ocorreu entre o adesivo e o pino Figura 38.

Tabela 8: Tensão de arrancamento à tração.

Código Controle	Espessura (μm)	Granulometria da lixa	Adesivo	Resistência à tração (MPa)
R 305/2	1178	120	<i>Loctite® 406</i>	11,9
R 305/3	1202	120	<i>Araldite® Hobby</i>	12,5
R 305/4	1325	220	<i>Araldite® Pro</i>	7,2
R 305/5	1115	120	<i>Araldite® Pro</i>	4,5
R 305/6	590	120	<i>Loctite® 406</i>	13,2
R 305/7	531	220	<i>Araldite® Pro</i>	9,1
R 305/8	550	120	<i>Araldite® Pro</i>	9,5
R 305/9	660	220	<i>Loctite® 406</i>	11,0
R 305/10	651	220	<i>J-B Weld®</i>	7,9
R 305/6	643	120	<i>Araldite® 1395</i>	5,8
R 305/10	651	220	<i>Araldite® 1395</i>	2,4
R 305/6	575	220	<i>3M® DP-460</i>	9,1
R 305/8	625	120	<i>3M® DP-460</i>	8,5
R 305/10	708	220	<i>3M® DP-460</i>	7,2

Figura 38: Amostra R 305/6 ensaiada com o adesivo Loctite®406 no dia 06/05/2015.



Devido ao baixo desempenho dos adesivos utilizados em função da propriedade de anti-aderência que o revestimento ECTFE apresenta, foram disponibilizadas amostras onde o pino foi inserido durante a aplicação do revestimento Halar®. Para este teste, os pinos também foram revestidos com primer e Halar® e, imediatamente após as aplicações, os pinos foram inseridos nas amostras. Como não se tinha uma expectativa da força necessária para arrancar o pino nestas

amostras, o equipamento foi utilizado na sua faixa superior de operação, isto é, foi utilizado o pistão F20. Vale ressaltar que este procedimento não está previsto na norma ASTM D4541.

Foram testadas as amostras R 313/1, R 313/3, R 314/1 e R 314/3, e os resultados são apresentados na Tabela 9. Em todas as amostras as falhas ocorreram no primer do pino, ou seja, em nenhum caso houve arrancamento do revestimento aplicado à placa de aço carbono. A inserção do pino no momento da aplicação do revestimento impossibilitou a medição da espessura da camada e a verificação de descontinuidades no revestimento.

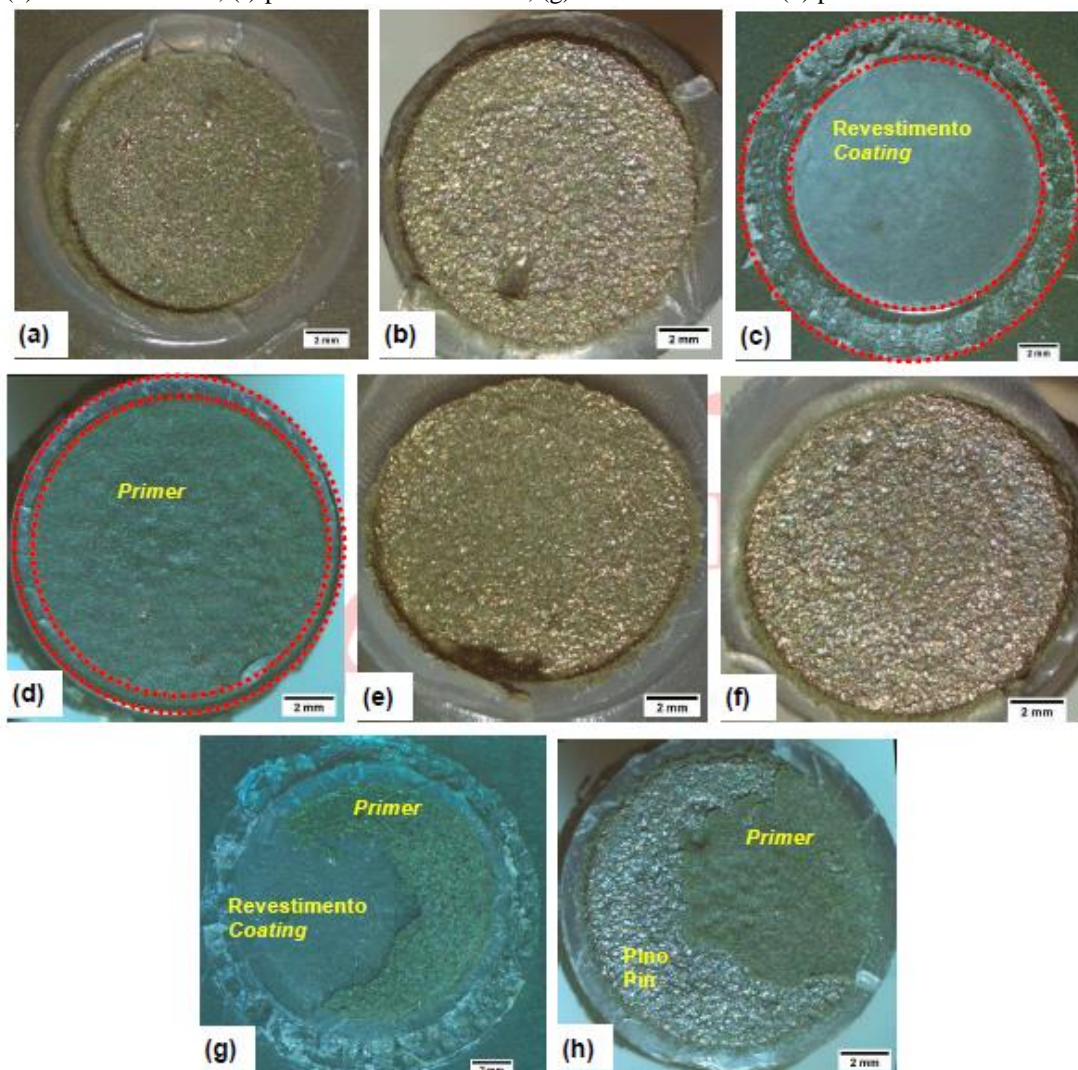
Tabela 9: Tensão de arrancamento à tração para amostras com pino inserido.	
<i>Código Controle</i>	<i>Resistência à tração (Mpa)</i>
R 313/1	30,0
R 313/3	28,3
R 314/1	23,8
R 314/3	28,0

Uma avaliação das novas superfícies geradas após os ensaios, com a remoção do pino da amostra, foi realizada. A Figura 39 apresenta as amostras vistas em lupa confirmando que não ocorreu descolamento do revestimento.

Como os pinos também haviam sido revestidos, a área efetiva de contato foi ligeiramente maior que $\frac{1}{2}$ polegada Figura 39 (d), e esse incremento foi considerado para o cálculo da resistência à tração. Também foi realizada uma remoção manual para suavizar o efeito de borda entre o pino e a placa revestida nas amostras R 313-3 e R 314-3 Figura 39(c) (g).

Como citado anteriormente, o valor exigido para qualificar o revestimento é de 20 MPa. Todas as amostras testadas com o pino inserido no revestimento alcançaram este patamar, entretanto, deve ser enfatizado que este caso, que elimina o uso de um adesivo, não está previsto na norma ASTM D4541.

Figura 39: (a) amostra R 313/1; (b) pino da amostra R 313/1; (c) amostra R 313/3; (d) pino da amostra R 313/3; (e) amostra R 314/1; (f) pino da amostra R 314/1; (g) amostra R 314/3 e (h) pino da amostra R 314/3.



5.2. ENSAIOS EM PROTÓTIPOS

Os resultados dos ensaios serão apresentados separadamente, porém os cinco testes realizados foram distribuídos em três protótipos da seguinte forma:

Válvula 1, timbrada com o código V1, foi submetida primeiramente ao Ensaio de Ciclos sobre Pressão com Testes de Vazamento. Após, a mesma foi desmontada e inspecionada e na sequência encaminhada ao fabricante para a remontagem e testes de validação sem reaplicação do revestimento. Retornando ao laboratório de ensaio, a válvula seguiu para o Ensaio de Circulação em Água com Areia em circuito fechado (looping) com Testes de Vazamento.

Válvula 2, timbrada com o código V2, foi submetida apenas ao Ensaio de Corrosão, em circuito fechado, com defeitos iniciais impostos no seu revestimento interno. Após, essa foi desmontada, inspecionada e devolvida ao seu fabricante.

Válvula 3, timbrada com o código V3, foi submetida primeiramente ao Ensaio de Circulação Sob Vazão em circuito fechado. Após, essa foi desmontada e inspecionada antes de ser devolvida ao seu fabricante para remontagem e testes de validação, retornando ao laboratório de ensaio, sem reaplicação do revestimento, a válvula foi submetida ao Ensaio de Corrosão, em circuito fechado, sem defeitos iniciais impostos no seu revestimento interno.

Após a desmontagem, as válvulas foram subdivididas em regiões para a realização da inspeção conforme apresentado na Figura 40. Região A: parte interna do lado jusante. Região B: canal de saída do lado jusante. Região C: lado montante com seu canal de entrada. Região D: interior do corpo da válvula.

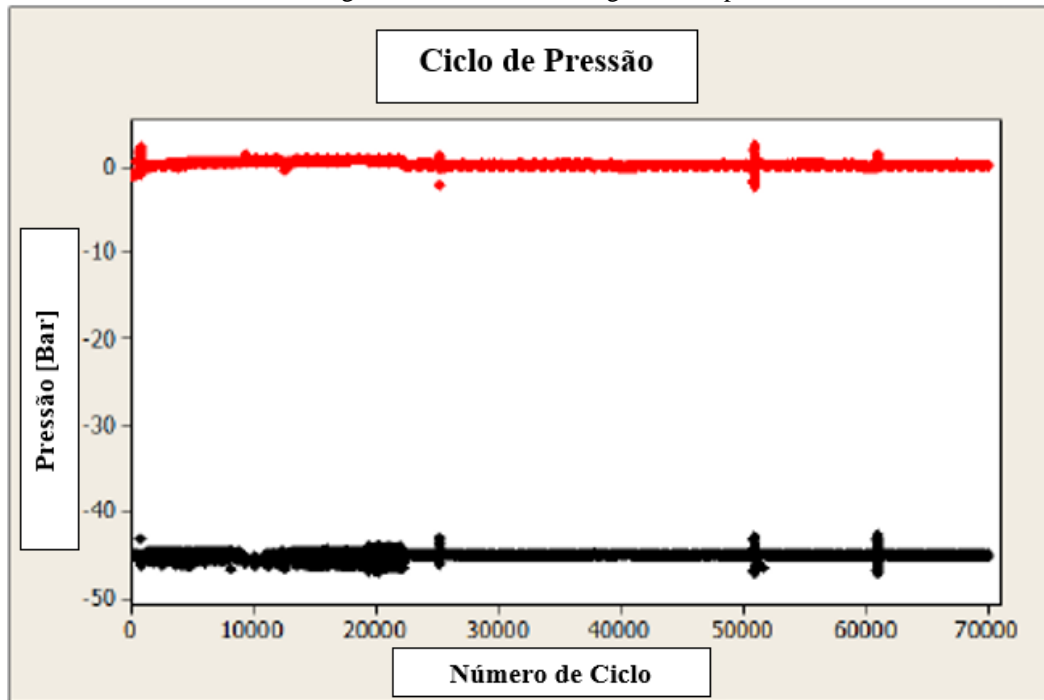
Figura 40: Subdivisões da válvula desmontada.



5.2.1. Ensaio de Ciclo de Pressão

Os dados de pressurização e despressurização coletados ao longo do ensaio apresentaram comportamento estável e sem alteração, conforme ilustrados na Figura 41. Pequenas variações ocorreram em alguns dos picos e dos vales, devido ao pequeno deslocamento do atuador durante os ciclos. Os deslocamentos pequenos são difíceis de serem controlados devido à incompressibilidade da água e a pouca quantidade de fluido necessária para preencher a cavidade da válvula.

Figura 41: Gráfico de ciclagem sobre pressão.



Os valores negativos, pontos pretos, indicam que o fluido de ensaio está sob compressão, ou seja, a válvula pressurizada. Os pontos em torno de zero indicam despressurização do sistema. A Tabela 10 apresenta média e desvio padrão dos dados citados.

Tabela 10: Média e desvio padrão do ensaio de ciclos de pressão.

Grandezas de interesse	Pressão (bar)
Média dos valores de vale	0,2339
Desvio padrão dos valores de vale	0,2621
Média dos valores de pico	45,27
Desvio padrão dos valores de pico	0,3349

5.2.1.1. Teste de vazamento

Foram realizados testes de vazamento em ambos os lados da válvula, ou seja, a montante e a jusante. Os resultados obtidos foram satisfatórios a válvula não apresentou vazamentos.

5.2.1.2. Inspeção do revestimento

Ao final do ensaio, a válvula 1 foi desmontada e o revestimento inspecionado. Possíveis descontinuidades no revestimento foram avaliadas com equipamento Elcometer® 266, conforme norma ASTM D5162:2008. A espessura do revestimento também foi verificada com o equipamento PosiTector® 6000 Advanced, conforme norma ISO 2808:2007. Em cada região, foram realizadas cinco verificações de espessura em pontos aleatórios do revestimento, e sua média foi calculada (Tabela 11). A medição de espessura do revestimento é utilizada como parâmetro de ajuste para verificação das descontinuidades.

Tabela 11: Parâmetros utilizados para inspeção da válvula 1 no seu primeiro ensaio.

<i>Região</i>	<i>Espessura(μm)</i>	<i>Desvio padrão (μm)</i>	<i>Tensão(KV)</i>	<i>Corrente(μA)</i>	<i>Falha</i>
A	557,4	14,10	2,7	20	NÃO
B	504,6	17,98	2,7	20	NÃO
C	676,6	85,95	3,3	20	NÃO
D	592,3	51,40	2,7	20	NÃO

Em nenhuma região foram encontrados defeitos no revestimento. Depois dessa análise, a válvula foi encaminhada para remontagem e testes de validação para prosseguir com o próximo ensaio proposto à válvula 1: Ensaio de Circulação em Água com Areia com Testes de Vazamento.

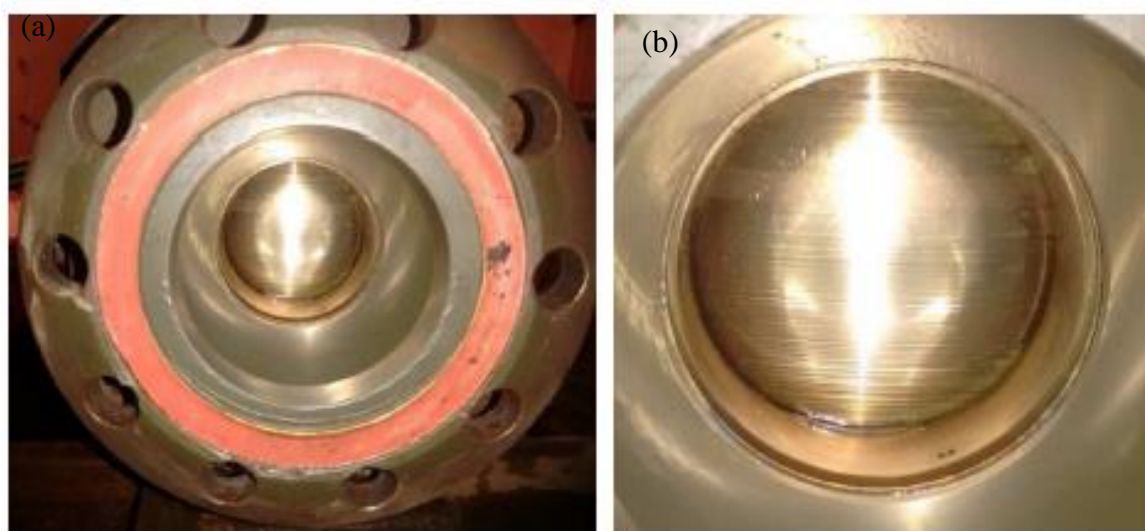
5.2.2. Ensaio de Circulação com água arenosa

Após a remontagem e a realização dos testes de validação, a válvula V1 foi submetida ao ensaio de circulação em água arenosa. O ensaio teve a duração total de 46 dias 07 horas e 50 minutos, sendo 6 semanas de ensaio e o restante de tempo representando paradas de manutenção.

Em atendimento aos parâmetros pré-estabelecidos em procedimento, os dados adquiridos durante o ensaio apresentaram-se conformes, o sistema apresentou média de vazão de 78,4 m³/h com desvio padrão de 2,5 m³/h. Considerando o diâmetro médio de 73 milímetros da entrada cônica a montante da válvula, tal vazão representa uma velocidade média de 5,2 m/s com desvio padrão de 0,2 m/s. Em relação à temperatura de trabalho, o sistema apresentou valor médio de 35,2 °C com desvio padrão de 0,5 °C.

Após finalizar o ensaio, a válvula foi retirada do looping e lavada apenas com água corrente. Nesse momento, observou-se um desgaste severo na esfera devido ao atrito com a areia presente no fluido de trabalho durante as operações de fechamento e abertura, Figura 42 (a) e (b).

Figura 42: Desgaste na esfera da válvula V1 após ensaio de circulação com água com areia.



5.2.2.1. Teste de vazamento

Ao realizar o ensaio, as válvulas apresentaram vazamento. O valor da taxa de vazamento foi contabilizado da seguinte forma: três medições foram realizadas durante o vazamento, cada uma com a duração de um minuto, e todas elas apresentaram volume próximo a 100 ml conforme ilustrado na Figura 43 (a), (b) e (c).

Figura 43: Vazamento registrado durante o ensaio.



O ensaio de vazamento tem como objetivo avaliar a funcionabilidade da válvula após o ensaio, porém independente de constatar a falha no material metálico, procedeu-se a desmontagem da válvula para avaliar as condições do revestimento orgânico sendo esse o objetivo principal.

5.2.2.2. Inspeção final do revestimento

Após os testes de vazamento, a válvula V1 foi desmontada e procedeu-se a avaliação do revestimento, Figura 44. Possíveis descontinuidades no revestimento foram verificadas com equipamento Elcometer® 266, conforme norma ASTM D5162:2008, e a espessura do revestimento foi verificada com o equipamento PosiTector® 6000 Advanced, conforme norma ISO 2808:2007.

Figura 44: Inspeção da válvula V1 desmontada após teste de vazamento.



Ao realizar a inspeção, conforme parâmetros apresentados na Tabela 12, foi possível concluir que nenhuma região apresentou defeitos no revestimento.

Tabela 12: Parâmetros utilizados na inspeção da válvula V1 no seu segundo ensaio.

<i>Região</i>	<i>Espessura(μm)</i>	<i>Desvio padrão (μm)</i>	<i>Tensão(KV)</i>	<i>Corrente(μA)</i>	<i>Falha</i>
A	559,6	11,97	2,7	20	NÃO
B	474,6	22,66	2,7	20	NÃO
C	557,7	57,88	2,7	20	NÃO
D	683,7	83,19	3,3	20	NÃO

5.2.3. Ensaios de Corrosão com Defeito

O ensaio de corrosão com defeito foi realizado na válvula V2, sendo esse o único ensaio realizado no protótipo. O ensaio teve a duração total de 93 dias 02 horas e 20 minutos, sendo 90 dias de ensaio e o restante de tempo representando paradas e manutenção do sistema.

Em conformidade com o procedimento de ensaio, todos os parâmetros foram

respeitados, dentre eles os dados de vazão, que apresentaram média de 45,8 m³/h com desvio padrão de 0,6 m³/h, isto é, velocidade média de 3,04 m/s no diâmetro médio com desvio padrão de 0,04 m/s. O valor de temperatura do fluido apresentou média de 35,2 °C, com desvio padrão de 0,8 °C. Os valores de pressão interna envolvida no ensaio são apenas as decorrentes das operações de fechamento e abertura da válvula, com picos não superiores a 2 bar.

5.2.3.1. Verificação do potencial e corrente de corrosão

O sistema de *loopings* apresenta diversos materiais com comportamentos eletroquímicos distintos (tubulação galvanizada, rotor da motobomba de bronze, carcaça da motobomba em ferro fundido, esfera da válvula em aço etc.), dessa forma, a medida do potencial representa um potencial misto gerado pela interação destes materiais com o eletrólito usado, isto é, água do mar sintética.

A Figura 45 (a) e (b) apresenta os gráficos gerados a partir da medição diária do potencial. A Figura 46 exibe o valor da corrente medida durante o ensaio. Os valores representam possíveis alterações e avanço dos defeitos ao longo do ensaio. Esse ensaio foi realizado no *looping* 3.

Figura 45: Potencial medido nos trechos A e B do *looping* 3

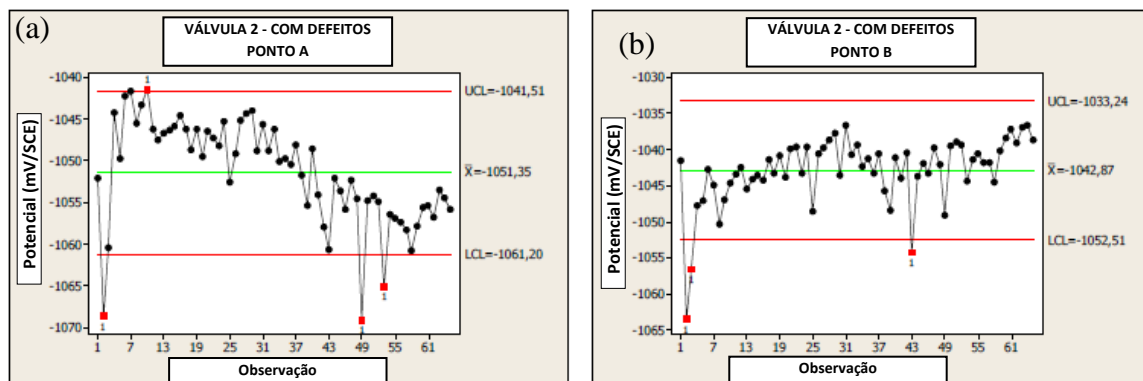
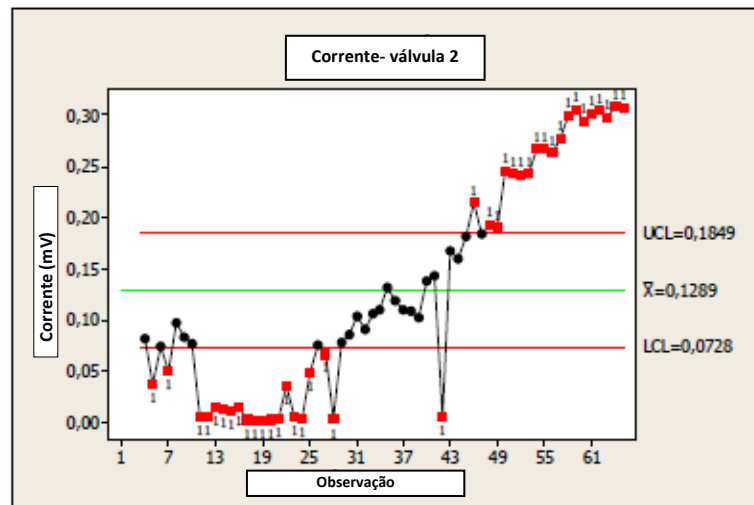


Figura 46: Corrente medida entre os trechos A e B do looping 3.



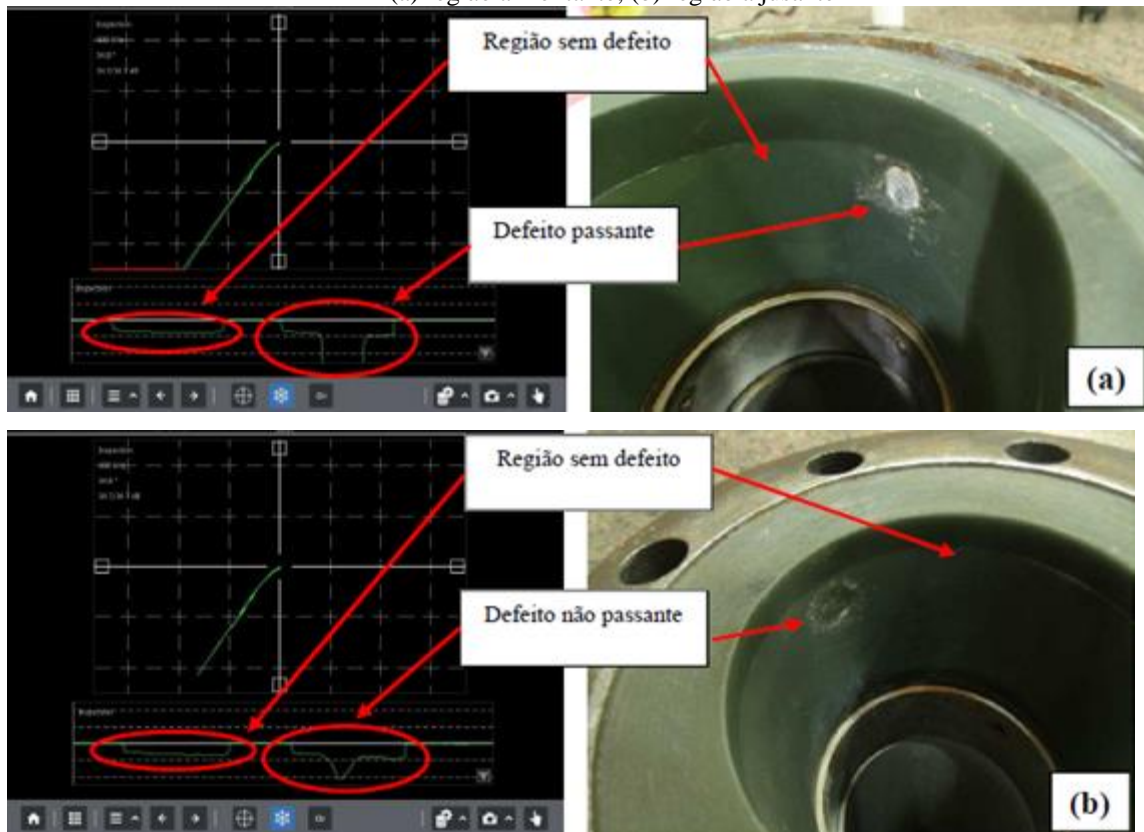
5.2.3.2. Inspeção final do revestimento

A inspeção de corrosão foi feita via correntes parasitas, com frequência da análise de 100 kHz, ganho de 35 dB e ângulo de fase de 35° conforme ilustrado na Figura 47. Não foram detectados avanços nos defeitos impostos propositalmente antes do início do ensaio Figura 48.

Figura 47: Inspeção via correntes parasitas na válvula V2 após ensaio de corrosão.

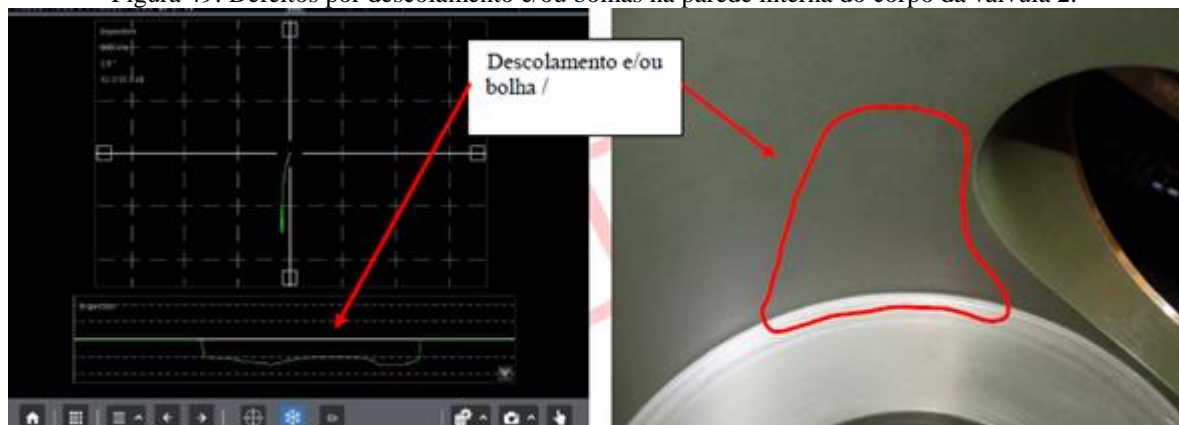


Figura 48: Indicação do equipamento de inspeção por correntes parasitas na válvula V2 após ensaio de corrosão.
(a) região a montante; (b) região a jusante



Ao realizar o ensaio de correntes parasitas, foi possível observar uma considerável área com descolamento e / ou formação de bolhas no revestimento interno da região D, conforme representado na Figura 49. Nessa etapa da verificação, outros parâmetros do equipamento de inspeção foram utilizados: frequência da análise de 100 kHz, ganho de 33,7 dB e ângulo de fase de 1,9°, sem afetar a qualidade da medição.

Figura 49: Defeitos por descolamento e/ou bolhas na parede interna do corpo da válvula 2.



O ensaio de correntes parasitas não foi realizado antes do ensaio de corrosão por se tratar de um ensaio não obrigatório, portanto, devido aos fatos expostos, não é possível afirmar que os defeitos de descolamento e / ou bolhas foram originados pelo ensaio de corrosão ou se já estavam presentes na válvula quando foi recebida para o ensaio.

Como a inspeção por correntes parasitas indicou modificações no perfil do revestimento em algumas regiões, foram feitas medições de espessuras para melhor investigar o que ocorreu, e os valores de espessura encontrados na região com defeito não variavam significativamente em relação às regiões que não apresentaram defeito de descolamento e / ou bolha. As medições de espessura foram realizadas pelo equipamento PosiTector 6000 FNS Probe.

5.2.4. Ensaios de Circulação sob Vazão

O ensaio de circulação sob vazão em água do mar sintética foi realizado na válvula V3. O ensaio teve uma duração total de 382 horas e 03 minutos, sendo 361 horas e 33 minutos de ensaio e 20 horas e 30 minutos de paradas.

Segundo os dados aquiridos durante o ensaio, o sistema apresentou média de vazão de 100,2 m³/h com desvio padrão de 0,2 m³/h. Considerando o diâmetro médio de 73 milímetros da entrada cônica a montante da válvula, tal vazão representa uma velocidade de 6,65 m/s. O valor de temperatura do fluido apresentou média de 35,2 °C com desvio padrão de 0,3 °C. Os valores de pressão internas envolvidas no ensaio são apenas as decorrentes das operações de fechamento e abertura da válvula, com picos não superiores a 2 bar.

Após realizar a desmontagem da válvula V3 procedeu-se a inspeção final do revestimento conforme os parâmetros apresentados na

Tabela 13, em nenhuma região foram encontrados defeitos no revestimento. Após essa etapa a válvula foi remontada e testada para seguir para o teste de corrosão sem defeito.

Tabela 13: Parâmetros utilizados para inspeção da válvula 3.

<i>Região</i>	<i>Espessura(μm)</i>	<i>Desvio padrão (μm)</i>	<i>Tensão(KV)</i>	<i>Corrente(μA)</i>	<i>Falha</i>
A	524,3	14,76	2,7	20	NÃO
	524,3	14,76	2,7	20	
B	491,4	39,83	2,7	20	NÃO
	491,4	39,83	2,7	20	
C	515,6	126,2	2,7	20	NÃO
	515,6	126,2	2,7	20	
D	535,4	60,60	3,3	20	NÃO
	535,4	60,60	2,7	20	

5.2.5. Ensaios de Corrosão sem Defeito

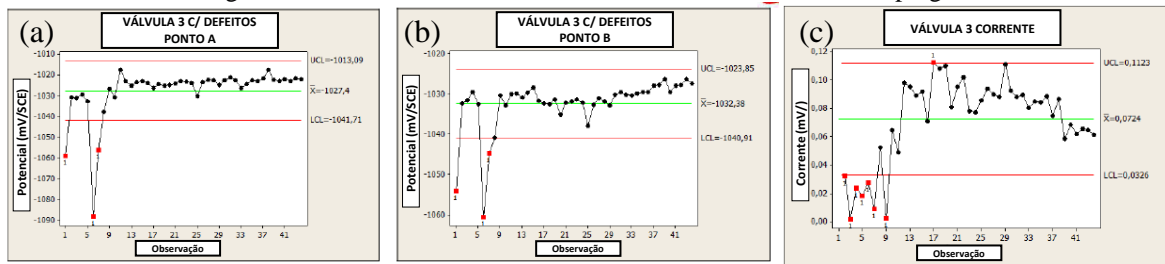
A válvula V3, após sua remontagem e a realização de seus testes de validação, foi submetida ao ensaio de corrosão em água do mar sintética com válvula sem defeitos, o qual teve a duração total de 67 dias, 16 horas e 02 minutos, sendo 60 dias, 02 horas e 51 minutos de ensaio e o restante do tempo consiste em paradas, para a manutenção do sistema.

De acordo com os dados de vazão aquisitados durante o ensaio, o sistema apresentou média de vazão de 46,1 m³/h com desvio padrão de 0,6 m³/h, isto é, velocidade média de 3,06 m/s no diâmetro médio com desvio padrão de 0,04 m/s. O valor de temperatura do fluido apresentou média de 34,9 °C com desvio padrão de 0,8 °C. Os valores de pressão internas envolvidas no ensaio são apenas as decorrentes das operações de fechamento e abertura da válvula, com picos não superiores a 2 bar.

5.2.5.1. Verificação do potencial e corrente de corrosão

A forma de medição do potencial e da corrente de corrosão segue o mesmo princípio utilizado no ensaio de corrosão com defeito. A Figura 50 (a), (b) e (c) apresenta os gráficos gerados a partir da medição diária do potencial e o valor da corrente medida durante o ensaio.

Figura 50: Potencial e Corrente medido nos trechos A e B do looping 2.



5.2.5.2. Inspeção final do revestimento

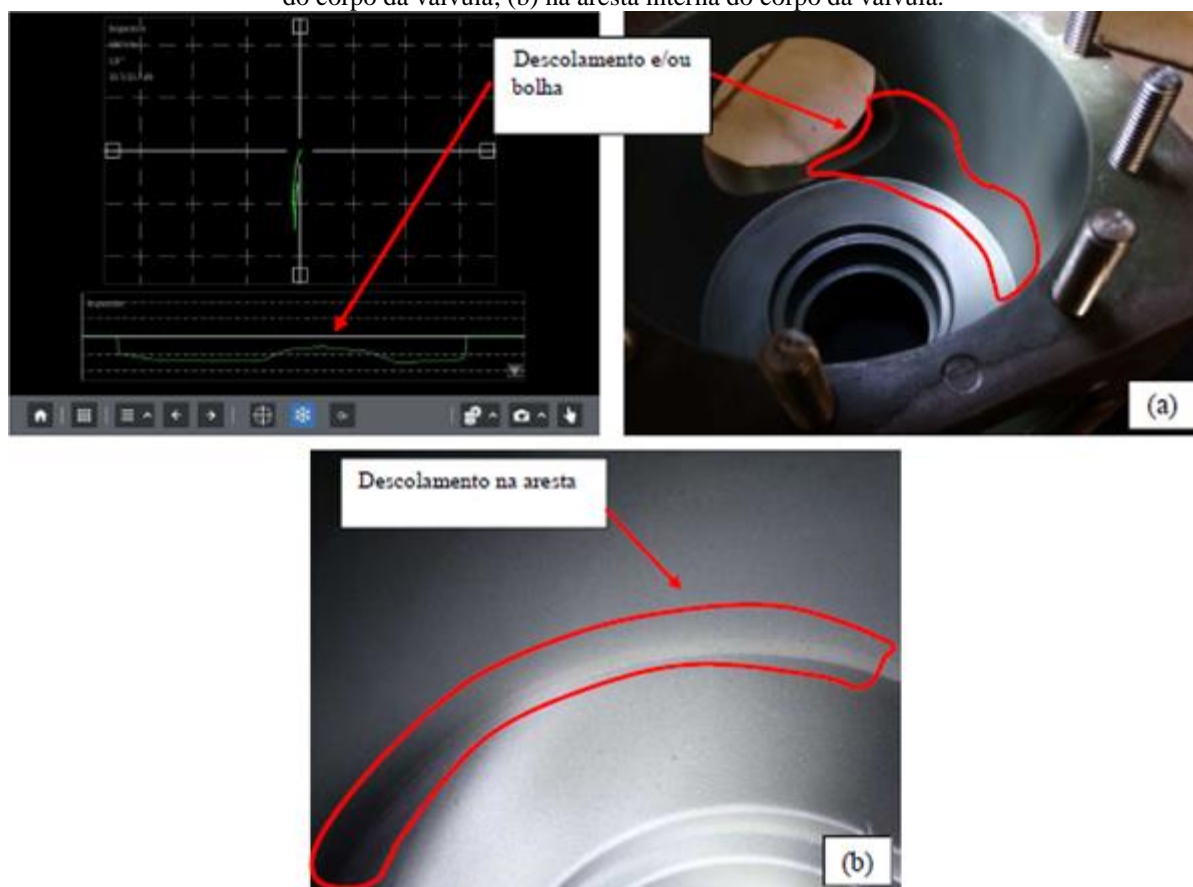
A inspeção de corrosão foi feita via correntes parasitas, com frequência da análise de 100 kHz, ganho de 33,7 dB e ângulo de fase de $1,9^\circ$ conforme ilustrado na Figura 51. Não foram detectados defeitos que expusessem o substrato (descontinuidades) ou que apresentassem uma considerável perda de espessura.

Figura 51: Inspeção da válvula 3 via correntes parasitas.



No entanto, foi observada uma grande área com descolamento e / ou formação de bolhas no revestimento interno da região D. Também foi verificado o descolamento na aresta interior da mesma região Figura 52.

Figura 52: Defeitos por descolamento e/ou bolhas na válvula V3 após ensaio de corrosão. (a) na parede interna do corpo da válvula; (b) na aresta interna do corpo da válvula.



5.2.6. Discussão do deslocamento do revestimento anticorrosivo orgânico

Ao finalizar os ensaios de corrosão com e sem defeitos impostos foi detectado regiões com deslocamento do revestimento, porém o revestimento atendeu plenamente aos requisitos de ensaios pré-estabelecidos em procedimento.

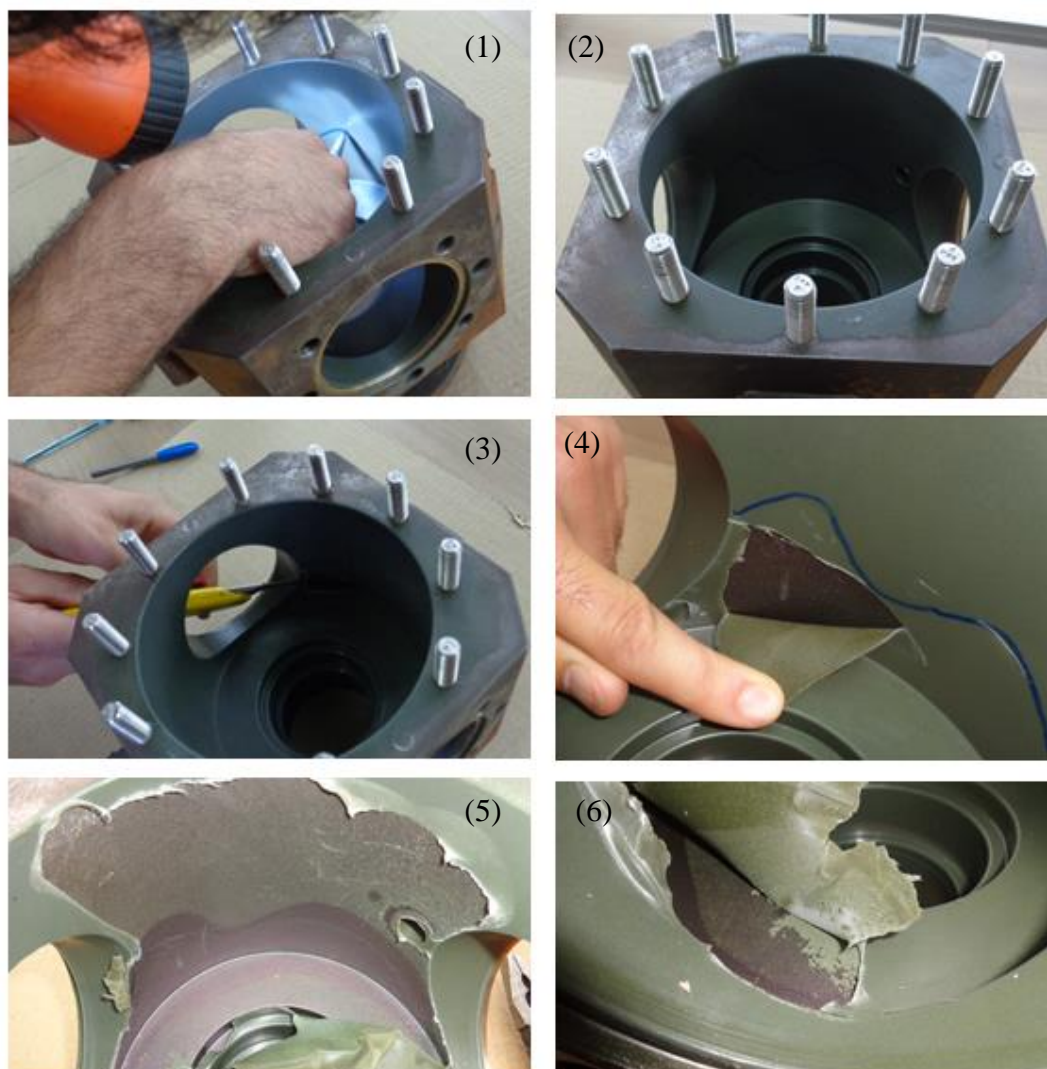
É importante ressaltar que a válvula desmontada foi aprovada pelo ensaio de Holiday Detector antes e depois dos testes, confirmando a integridade do revestimento e a proteção do metal revestido. Esse é o ensaio habitual que é realizado para assegurar a integridade do revestimento orgânico em todos os componentes revestidos. A descontinuidade encontrada foi detectada pelo ensaio de correntes parasitas, o qual não era utilizado anteriormente a este trabalho no processo de revestimento interno da empresa.

Com o objetivo de investigar as possíveis causas do problema detectado uma análise envolvendo o processo de revestimento orgânico foi realizada.

O revestimento orgânico foi removido na região que apresentou o deslocamento conforme ilustrado na sequência de fotos da Figura 53. Foi possível observar que o substrato

da válvula não apresentou alteração, ou seja, não houve permeação do fluido de teste e consequentemente a peça não apresentou pontos de corrosão em sua superfície metálica.

Figura 53: Sequencia de operações realizadas para analisar o deslocamento do revestimento



Após a remoção do revestimento é possível afirmar com base no conhecimento prático do processo e devido a ocorrências anteriores, que a origem do problema de descolamento e/ou bolhas está relacionada diretamente com o processo de aplicação do revestimento orgânico.

Ao realizar uma análise técnica do processo, é possível concluir que o problema de deslocamento está mais especificamente relacionado com a temperatura de aplicação do revestimento orgânico e a preparação da superfície da peça.

O controle da temperatura no ato da aplicação do revestimento orgânico desempenha um papel fundamental para garantir a máxima aderência do mesmo sobre a superfície metálica da peça. O gradiente de temperatura deve ser cuidadosamente controlado e respeitado de acordo

com o procedimento interno I-REVO001. Dessa forma, ao realizar a aplicação do revestimento orgânico, a peça deve apresentar uma temperatura homogênea e uniforme ao longo de toda sua superfície.

Como é possível observar, a válvula apresenta uma geometria complexa e espessura de parede com grandes variações. Essas características, associadas aos gradientes de temperatura de aplicação, contribuem diretamente para o resultado obtido.

Como regra geral, em conformidade com o procedimento, a peça é aquecida em um forno por um período de aproximadamente 20 a 30 minutos entre 260 a 290°C. Porém o mesmo princípio foi utilizado para essa válvula, a qual não apresenta geometria e espessuras uniformes. Perante essa relação, torna-se evidente a origem da falha ocorrida.

Além da temperatura, foi analisada a questão da preparação da superfície, a qual colaborou com o problema ocorrido. O jateamento abrasivo foi realizado em um jato rotativo automático. Dessa forma, devido à geometria complexa da peça, as regiões de difícil acesso podem apresentar uma rugosidade menor e prejudicar a ancoragem do revestimento.

Toda a superfície a que irá receber o revestimento orgânico deve ser subementida ao jateamento abrasivo ao Grau SA 3, conforme norma ISO 8501-1 e 2. Conforme salientado anteriormente, por se tratar de uma geometria complexa, o acesso do abrasivo em determinados pontos ficou limitado, colaborando assim para o somatório de fatores que resultaram na descontinuidade encontrada.

O comportamento do Revestimento Anticorrosivo Orgânico ECTFE em projetos de válvulas industrial do tipo esfera foi apresentado em outro trabalho de dissertação (GASPARETTO 2014). O qual comprovou por meio de inúmeros testes o bom desempenho do revestimento e a aprovação do processo de aplicação sem evidências de descontinuidades. No entanto no trabalho de Gasparetto as válvulas apresentaram características geométricas mais simples.

6. CONCLUSÕES

Ao finalizar os ensaios propostos para avaliar o comportamento do revestimento anticorrosivo orgânico ECTFE (Halar®) em aplicações em válvulas subsea, foi possível concluir:

- ✓ Revestimento possui a capacidade de suportar condições de aplicação com elevado grau de agressividade;
- ✓ Apresentou um ótimo comportamento uniforme ao longo de um determinado período de aproximadamente 6 meses de ensaios sem interferências;
- ✓ Manteve sua integridade sem afetar a funcionalidade do equipamento a qual foi aplicado;

Os problemas de deslocamento que foram detectados ao final dos ensaios de corrosão com e sem defeito foram analisados e as possíveis causas do ocorrido identificadas sendo elas a temperatura de aplicação e preparação da superfície.

- ✓ As discontinuidades não interferiram nos resultados obtidos ao longo dos ensaios realizados.
- ✓ Inúmeras medidas foram tomadas para corrigir tais parâmetros julgados responsáveis pelo ocorrido.
- ✓ A realização de novos ensaios para comprovar as melhorias realizadas tona-se de suma importância como um trabalho futuro.
- ✓ Os resultados obtidos foram considerados satisfatórios segundo os critérios de aceitação pré-estabelecidos em procedimentos.

A aplicação do revestimento anticorrosivo orgânico em válvulas do tipo esfera para operações *subsea* torna-se uma alternativa viável e garantida, devido a sua elevada resistência em relação às condições de operação que envolvem esse ambiente hostil.

A integridade e o desempenho aceitável do revestimento anticorrosivo orgânico para aplicações em válvulas *subsea* depende fundamentalmente de um controle rigoroso de todo o processo de preparação e aplicação do revestimento, como também da realização de todos os ensaios obrigatórios ao longo das etapas.

A realização de uma análise técnica do equipamento voltada aos detalhes comparativos ao processo produtivo é fundamental para evitar problemas que foram imperceptíveis durante a execução do processo de aplicação do revestimento orgânico.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados apresentados, uma análise foi realizada com o objetivo de identificar as possíveis causas da descontinuidade encontradas, durante a inspeção do revestimento orgânico. Perante isso, foi possível concluir que as mesmas estão relacionadas diretamente com a temperatura de aplicação e preparação da superfície. Dessa forma, algumas ações serão tomadas, e outras devem ser estudadas como:

- a) Realizar um estudo aprofundado referente aos parâmetros de controle de temperatura utilizados no processo de aplicação do revestimento orgânico.
- b) Buscar formas alternativas para realizar a preparação de superfície de forma eficiente para peças que apresentam regiões com geometrias complexas.
- c) Realizar alterações nos parâmetros do processo de aplicação do revestimento orgânico, consequentemente nos procedimentos.
- d) Realizar novos ensaios para comprovar que os parâmetros revisados do processo de aplicação do revestimento atendem aos requisitos mínimos de qualidade.
- e) Verificar a possibilidade de incrementar o ensaio de correntes parasitas para garantir uma inspeção final mais confiável no que diz respeito a possíveis descontinuidades de deslocamento do revestimento orgânico.

8. REFERÊNCIAS

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. API 6D. Specification for Pipeline Valves. Washington : API, 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR METALS. Corrosion. Metals Handbook. s.l. :, 1992. Vol. 13.

ANSI/API 6D/ISO 14313. Petroleum and natural gas industries: Pipeline transportation systems - Pipeline valves. Washington: API, 2008.

ANEES U. Corrosion behavior of steels in Gulf seawater environment ELSEVIER. 1999. Artigo.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. ASME B16.34. Valves Flanged, Threaded, and Welding End. New York : ASME, 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D2240. Standard Test Method for Rubber Property—Durometer Hardness. Pennsylvania : astm, 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D4541. Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers. New York : ASTM, 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D6132 Standard Test Method for Nondestructive Measurement of Dry Film Thickness of Applied Organic Coatings Using an Ultrasonic Coating Thickness Gage: : ASTM, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E466 Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials: ASTM, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM A572 Standard Specification for High-Strength Low-Alloy Columbium-Vanadium Structural Steel: ASTM, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM A633 Standard Specification for Normalized High-Strength Low-Alloy Structural Steel Plates. (2015).

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D5162 Standard Practice for Discontinuity (Holiday) Testing of Nonconductive protective Coating on Metallic Substrates (2010);

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10443. Determinação da espessura de película seca sobre superfícies rugosas - Método de ensaio. Rio de Janeiro : ABNT, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ASTM D1141–Standard Practice for the Preparation of Substitute Ocean Water. (2013).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15488. Pintura Industrial - Superfície Metálica para aplicação de tinta - Determinação do perfil de rugosidade. Rio de Janeiro : ABNT, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15827. Válvulas industriais para instalações de exploração, produção, refino e transporte de produtos de petróleo - Requisitos de projeto e ensaio de protótipo. Rio de Janeiro : ABNT, 2011.

COSTA M. R., de Oliveira. 2009. Estudo de Torque de acionamento e vida útil em um projeto de de válvulas industriais. Porto Alegre : UFRGS, 2009. Dissertação de Mestrado.

COSTA, EDUARDO. 2009. Estudo da aplicação de materias orgânicos em meios corrosivos do processamento primário do petróleo. Porto Alegre : UFRGS, 2009. Dissertação de Mestrado.

DEVILBISS. Equipamento Eletrostático para pintura a pó. São Paulo : DeVILBISS, 2013. Manual de Instruções.

DICKENSON, T. Christopher. Valves, Piping and Pipelines Handbook. New York: Elsevier Science Ltd., 1999.

DR-ENGP-1. Piping material - Standardization (ET-200-3 Appendix 18). Rio de Janeiro : PETROBRAS, 2010. Especificação Técnica.

D-SMA/ING/SPF/TCNA-14-00047 – Programa de qualificação do revestimento HALAR® Qualification program for HALAR® coating;

ET-940-PEN-006. Revestimento interno anticorrosivo para válvulas. s.l. : PETROBRAS, Rev. D - 2012. Especificação Técnica.

FORSMAN, Camilla, e Jenny MORIN. World Valve: Development of an Outdated Valve Range. North Plymton: Lulea University of Technology - Master Of Science Programme: Ergonomic Design & Production Engineering, 2005.

GASPARETTO, Douglas. Projeto e validação de válvula industrial do tipo esfera com revestimento anticorrosivo orgânico interno. 2014.

GENTIL, V.. Corrosão. 6. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2011

GEM-PE-007 – Revisão 02 / Review 02 – Ensaio de Fadiga Axial / Axial Fatigue Test;

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 4624. Paints and varnishes -- Pull-off test for adhesion. s.l. : ISO, 2002.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 2808. Paints and varnishes – Determination of film thickness ISO 2007;

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 8501-1. Preparation of steel substrates before application of paints and related products - Visual assessment of surface cleanliness. Switzerland : ISO, 2007.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 8502-3. Preparation of steel substrates before application of paint and related products - Test for the assessment of surface cleanliness - Part3 - Assessment of dust on steel surfaces prepared for painting (pressure-sensitive tape method). s.l. : ISO, 1992.

KMW. KMW Equipamentos de Pintura Ltda. www.kmwrs.com.br. [Online] 2013. Acessado em 10/11/2015.

KOEBSCH, André, et al. 2012. Revestimento anticorrosivo de válvulas: A sua importância e a dinâmica da análise do seu desempenho. INTERCORR. Salvador : ABRACO, 2012. INTERCORR2012_377.

KOEBSCH, André, NUNES, Erik Barbosa e ALMEIDA, Fabrizio Cruz de. 2010. Revestimento orgânico interno de válvula esfera: Caso prático. INTERCORR. ABRACO. Fortaleza-CE : 2010.

- LALGUDI V. Ramanathan. Corrosão e seu Controle. Ed. Hemus. Brasil Editora Ltda, 1990.
- LEIVO E., et al. Properties of thermally sprayed fluoropolymer PVDF, ECTFE, PFA and FEP coatings. ELSEVIER. 2003. Artigo.
- MAGGI, G. e MARRERO, L. 2009. Managing Corrosion With ECTFE Coatings. Bollate : Solvay Solexis, 2009. Relatório Técnico.
- MATHIAS, Artur Cardozo. 2008. Válvulas: Industriais, segurança, controle: tipos, seleção, dimensionamento. São Paulo : Artliber, 2008.
- MEDEIROS, Felipe A., et al. 2012. Seleção de Liners de Fluoropolímeros em Aplicações de Proteção à Corrosão para a Indústria Química e Petroquímica. ABRACO. Salvador : INTERCORR, 2012.
- METALCOATING. Revestimentos Anticorrosivos. São Paulo : METALCOATING Revestimentos, 2013. Catálogo Técnico.
- MICROMAZZA. Válvulas Industriais. Vila Flores: MICROMAZZA, 2015. Arquivo Micromazza.
- MNA. Válvulas Esfera - Catálogo Técnico. São Paulo : Lupatech, 2012. Catálogo Técnico.
- NORMA TÉCNICA PETROBRAS. N13. Requisitos Técnicos para Serviços de Pintura. Rio de Janeiro : PETROBRAS, Rev. K - 2012.
- NORMA TÉCNICA PETROBRAS. N-2137. Determinação de Descontinuidade em Películas secas de tintas. Rio de Janeiro : PETROBRAS, 2007.
- NORMA TÉCNICA PETROBRAS. N9. Tratamento de Superfície de aço com Jato Abrasivo e Hidrojateamento. Rio de Janeiro : PETROBRAS, 2010.
- NATIONAL ASSOCIATION OF CORROSION ENGINEERS. NACE 5. Surface Preparation and Cleaning of Metals by Waterjetting Prior to Recoating. SSPC-SP 12. Pittsburgh : NACE, 2002.
- NATIONAL ASSOCIATION OF CORROSION ENGINEERS. NACE 6G. Thermal Pre-heating. SSPC-SP-TR1. Thermal Pre-heating : NACE, 1994.

NATIONAL ASSOCIATION OF CORROSION ENGINEERS. NACE SP0178. Design, Fabrication, and Surface Finish Practices for Tanks and Vessels to Be Lined for Immersion Service. Texas : NACE, 2007.

NATIONAL ASSOCIATION OF CORROSION ENGINEERS. NACE SP0188. Discontinuity (Holiday) Testing of New Protective Coatings on Conductive Substrates. Texas : NACE INTERNATIONAL, 2006.

PANNONI, Fábio Domingos; Princípios da proteção de estruturas metálicas em situação de corrosão e incêndio. 2007. Disponível em: (http://www.gerdau.com.br/gerdauacominas/br/produtos/pdfs/manual_corrosao.pdf). Acessado em 10/11/2015.

QUINTELA, Joaquim P. e SOLYMOSSY, Victor. Materiais para revestimento de tubulações para instalação de produção e processo. Rio de Janeiro : PETROBRAS - CENPS, 2010. Relatório Técnico.

SENATORE, Marcelo, FINZETTO, Leandro e PEREA, Eduardo. 2007. Estudo comparativo entre os aços inoxidáveis dúplex e os inoxidáveis AISI 304L/316L. Scielo - Revista Escola de Minas. Ouro Preto MG - Brazil, 2007.

SILVA, Osmar José Leite da. 2008. Válvulas Industriais. Rio de Janeiro : Qualitymark:Petrobras, 2008.

Simone, S., et al. Preparation and characterization of ECTFE solvent resistant membranes and their application in pervaporation of toluene/water mixtures. ELSEVIER. Saudi Arabia : 2012. Artigo.

SKOUSEN, Philip L. 2004. Valve Handbook. New York : McGraw-Hill, 2004.

SMITH, Peter, e R. W. ZAPPE. Valve Selection Handbook: Engineering Fundamentals for Selecting the Right Valve Design for Every Industrial Flow Application. London: Elsevier Science Ltd., 2004.

SOLVAY SOLEXIS. Ethylene-Chlorotrifluoroethylene - Design and Processing Guide. Milano : SOLVAY SOLEXIS, 2006. Especificação Técnica.

TELES, Diógenes Barbosa Teles. Requisitos de projeto e ensaio de protótipo para homologação de válvula do tipo esfera conforme norma ABNT NBR 15827. Bento Gonçalves: UCS - CARVI, 2013.

TONATTO, Maikson Luiz Passai. Projeto de Válvula Industrial do Tipo Esfera Conforme Norma ABNT NBR 15827. Bento Gonçalves: UCS - CARVI, 2011.

ZUGNO, Diego Zugno. Caracterizar e certificar conforme norma Petrobras um revestimento a base de etileno- clorofluoroetileno (ECTFE) aplicado em válvulas de submarino Caxias do Sul: UCS, 2015

—. Halar® ECTFE - Processing Guide - Electrostatic Powder Coating. Milano : SOLVAY SOLEXIS, 2009. Manual.

—. Halar® ECTFE chemical resistance chart. Bollate : SOLVAY SOLEXIS, 2010. Technical Information.

—. Revestimento por pintura Eletrostática Halar®ECTFE. Milano : SOLVAY SOLEXIS, 2011. Apresentação.